

UNIVERSIDAD DE CUENCA



FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS ESCUELA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO HIDROLÓGICO HBV - LIGHT EN UNA MICROCUENCA DE PÁRAMO”.

TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL

AUTORA:

ISABEL MICAELA MONTALVÁN URGILES.
C.I. 0105197537

DIRECTOR:

ING. ROLANDO ENRIQUE CÉLLERI ALVEAR, PhD.
C.I. 0602794406

CUENCA – ECUADOR

MARZO - 2017

RESUMEN

La modelación hidrológica es una herramienta útil para entender los procesos que conforman el ciclo hidrológico de una cuenca. Actualmente, varios modelos hidrológicos han sido aplicados alrededor del mundo y en diferentes ecosistemas. No existen suficientes aplicaciones en nuestros ecosistemas andinos que puedan ser utilizados como base para estudios futuros. HBV – light (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) es un modelo semidistribuido o agregado, conceptual y continuo, que ha sido desarrollado en varios países con zonas montañosas. Sin embargo; no se registran estudios realizados con HBV – light en zonas andinas. Se plantea realizar la calibración, validación y análisis del desempeño del modelo HBV – light en una cuenca de páramo. Se utilizaron series de tiempo de precipitación, temperatura del aire, caudal, evapotranspiración de referencia e información espacial tomada del Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay. Se analizaron 8 estructuras distintas del modelo. La autocalibración fue utilizada optimizando los modelos para los criterios: Nash – Sutcliffe, Logaritmos de Nash Sutcliffe (Nash – ln) y Sesgo Relativo (Bias). Los resultados indicaron que HBV – light semidistribuido se adapta mejor a la zona de estudio. Los resultados de las estructuras para cada optimización fueron: Nash – Sutcliffe, el Modelo Estándar (Versión Básica); Nash – ln, el Modelo Estándar (Versión Básica) y Bias, el Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ). Por lo tanto, concluimos que el modelo estándar es la estructura más adaptable a la cuenca. El estudio indicó que el modelo HBV – light es aplicable a ecosistemas de páramo por las condiciones de adaptabilidad de estructuras hacia la cuenca de interés.

Palabras Clave: modelación hidrológica, HBV – light, páramo, índices de eficiencia, Ecuador, Andes.

ABSTRACT

Hydrological modeling is a useful tool to understand processes that make up the hydrological cycle of a basin. Nowadays, several hydrological models have been applied in different ecosystems around the world. There are not enough applications in our Andean ecosystems that can be used as a basis for future studies. HBV – light (Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning) is a semi-distributed or aggregate, conceptual and continuous model, which was developed and tested in several countries with mountainous areas. However, there are not published studies using HBV - light in Andean regions. In the present thesis, it is proposed to carry out the calibration, validation and analyze about the performance of the HBV - light model in a *páramo* basin. They were used precipitation, air temperature, discharge, transfer evapotranspiration and spatial information from the Zhurucay Ecohydrological Observatory. Eight different structures of the model were analyzed. Self - calibration was used to optimizing the models for Nash – Sutcliffe test (standard model version), Nash Sutcliffe (Nash - ln) logarithms (standard model version) and Relative Bias (Bias). The results showed us that semi - distributed HBV - light is better adapted to the study area. The results for each optimization were: Nash – Sutcliffe, the Standard Model (Basic Version); Nash – ln, the Standard Model (Basic Version) and Bias, the Standard Model (UZL Version, K0 in the SUZ box). In conclusion, standard model is the most adaptable structure to the basin. The study indicated that the HBV - light model is applicable to *páramo* ecosystems because the conditions of adaptability of structures towards the basin of interest.

Key Words: hydrological modeling, HBV-Light, *páramo*, efficiency indexes, Ecuador, Andes.



CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUCCIÓN.....	12
OBJETIVOS	17
Objetivo General:	17
Objetivos Específicos:.....	17
2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
2.1 Descripción del área de estudio e instrumentación.....	18
2.2 Datos.....	21
2.3 Metodología General.....	22
2.3.1 Modelo Hidrológico HBV – light.....	24
2.3.2 Datos de entrada.....	24
2.3.2.1 Datos para Calibración y Validación.	24
2.3.3 Estructura del modelo HBV	26
2.3.4 Parámetros Iniciales.....	26
2.3.5 Criterios de Eficiencia	27
2.3.6 Calibración	29
2.3.6.1 Autocalibración	29
2.3.6.2 Evaluar parámetros	30
2.3.7 Validación	30
2.3.7.1 Correr el Modelo.....	30
2.3.7.2 Evaluar Ajustes.....	30
2.3.8 Próxima estructura del modelo.....	31
2.3.9 Evaluación del desempeño del modelo.....	31
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	31
3.1 Caracterización de la lluvia del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay. 31	
3.2 Resultados de problemas encontrados.....	33
3.3 Resultados del Modelo HBV – light agregado y semistribuido.....	34
3.3.1 Resultados de Calibración y Validación para el Modelo HBV – light agregado.....	35



3.3.1.1 Optimizado por Nash – Sutcliffe.	35
3.3.1.2 Optimizado por Nash – In.	39
3.3.1.3 Optimizado por Sesgo Relativo Bias.	43
3.3.2 Conclusiones para el Modelo HBV – light agregado.	47
3.3.3 Resultados la Calibración y Validación para el Modelo HBV – light semidistribuido.	47
3.3.3.1 Optimizado por Nash - Sutcliffe	48
3.3.3.2 Optimizado por Nash – In.	52
3.3.3.3 Optimizado por Sesgo Relativo Bias.	56
3.3.4 Conclusiones para el Modelo HBV – light semidistribuido.	60
4. CONCLUSIONES FINALES.	61
5. RECOMENDACIONES.	63
6. TRABAJO FUTURO.	64
REFERENCIAS.	65
ANEXOS.	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Área de Estudio, Cobertura Vegetal e Hidrografía.	20
Figura 2: Ubicación de la estación meteorológica, pluviómetros y vertederos del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay.	22
Figura 3: Datos de caudales específicos usados en la validación.	33
Figura 4: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) Optimizado por Nash – Sutcliffe.	37
Figura 5: Calibración y Validación del Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica) Optimizado por Nash – Sutcliffe.	38
Figura 6: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión Básica) Optimizado por Nash – In.	41
Figura 7: Calibración y Validación del Modelo de 3 Capas De Agua Subterránea (Distribución STZ) Optimizado por Nash – In.	42
Figura 8: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión Básica) Optimizado por Sesgo Relativo Bias.	45
Figura 9: Calibración y Validación del Modelo De 3 Capas De Agua Subterránea (Distribución STZ) Optimizado por Sesgo Relativo Bias.	46
Figura 10: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión Básica) Optimizado por Nash – Sutcliffe.	50
Figura 11: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la Capa SUZ) Optimizado por Nash – Sutcliffe.	51
Figura 12: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión Básica) Optimizado por Nash – In.	54
Figura 13: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la Capa SUZ) Optimizado por Nash – In.	55
Figura 14: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la Capa SUZ) Optimizado por Sesgo Relativo Bias.	58
Figura 15: Calibración y Validación del Modelo Distribuido (Versión UZL, K0 en la Capa SUZ) Optimizado por Sesgo Relativo Bias.	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Diferentes materiales y datos que se implementarán en el estudio...	21
Tabla 2: Datos usados para la calibración.....	25
Tabla 3: Parámetros para el desarrollo del modelo.	27
Tabla 4: Límite de los parámetros que son sometidos a calibración.	29
Tabla 5: Lluvia anual de los pluviómetros ubicados en el Observatorio.	32
Tabla 6: Valores de los índices de eficiencia Optimizado Por Nash – Sutcliffe.	36
Tabla 7: Valores de los índices de eficiencia Optimizado Por Nash – In.	39
Tabla 8: Valores de los índices de eficiencia Optimizado Por Sesgo Relativo Bias.....	43
Tabla 9: Valores de los índices de eficiencia Optimizado Por Nash - Sutcliffe.	48
Tabla 10: Valores de los índices de eficiencia Optimizado Por In - Nash.....	52
Tabla 11: Valores de los índices de eficiencia Optimizado Por Sesgo Relativo Bias.....	56



Universidad de Cuenca
Clausula de derechos de autor

Yo, Isabel Micaela Montalván Urgiles, autora del Trabajo de Titulación "EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO HIDROLÓGICO HBV - LIGHT EN UNA MICROCUENCA DE PÁRAMO", reconozco y acepto el derecho de la Universidad de Cuenca, en base al Art. 5 literal c) de su Reglamento de Propiedad Intelectual, de publicar este trabajo por cualquier medio conocido o por conocer, al ser este requisito para la obtención de mi título de Ingeniero Ambiental. El uso que la Universidad de Cuenca hiciere de este trabajo, no implicará afección alguna de mis derechos morales o patrimoniales como autora.

Cuenca, 13 de Marzo de 2013

Isabel Micaela Montalván Urgiles

C.I: 0105197537



Universidad de Cuenca
Clausula de propiedad intelectual

Yo, *Isabel Micaela Montalván Urgiles*, autora del Trabajo de Titulación *EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL MODELO HIDROLÓGICO HBV – LIGHT EN UNA MICROCUENCA DE PÁRAMO*, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autora.

Cuenca, 13 de Marzo de 2017

Isabel Micaela Montalván Urgiles

C.I: 0105197537



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a Dios, por haberme dado la vida, por permitirme afrontarla cada día y hoy por la oportunidad de lograr una meta importante.

Agradezco infinitamente a mi director de Tesis Ing. Rolando Céleri Alvear, PhD por haber dirigido mi proyecto, compartiendo sus conocimientos y experiencias para llegar a culminar con éxito y poder obtener el título universitario.

Al Ing. Adrián Sucozhañay por brindarme su ayuda ante inquietudes y dificultades presentadas durante el desarrollo de la tesis.

De igual manera agradecer al personal del Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca, quienes fueron los que aportaron con la información necesaria para que se desarrolle de manera excelente el trabajo de tesis.



DEDICATORIA

A mis padres Miguel y Aida por haberme dado todo su amor, su apoyo y fortaleza para culminar esta bella carrera profesional. Trataré de retribuir el esfuerzo durante mi vida.

A mi hermano Oswaldo, por ser mi ejemplo, y soporte para mantenerme de pie y continuar luchando por mis sueños, mi cuñada Ximena, gracias por su enseñanza y cariño.

A mis sobrinos, Santiago y Sofía que son los seres más grandes que llegaron a mi vida, gracias al amor tan puro que ellos transmiten, logré hoy culminar mi tesis.

A Alexis por motivarme a cumplir con esta meta.

A mi prima Samantha por haber estado siempre conmigo.

A mis amigos Daniela A., Mayra P., Daniela P., Katherine V., Jorge N., por su apoyo y amistad sincera en todos estos años ideales.

De igual manera dedico a todas las personas que directa o indirectamente colaboraron para que hoy culmine con éxito mi carrera profesional.

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas de montaña ofrecen servicios ambientales de alto valor como: suministro y regulación de agua, retención de carbono, reducción de la escorrentía superficial y prevención de la erosión (Carrasco, 2015). Los principales ecosistemas tropicales de montaña son: bosque (alrededor de hasta los 3500 m.s.n.m.), páramo (entre 3500–5000 m.s.n.m.) y glaciares o zonas de nieve (desde los 5000 m.s.n.m. aproximadamente) (Padrón, 2013). Los páramos son los ecosistemas de montaña más representativos del Ecuador, cubriendo el 6% del área nacional con 1.250.000 ha; de acuerdo a esto es el país que más páramos tiene con respecto a su extensión total. (Mena & Hofstede, 2006).

El páramo se encarga del servicio ambiental más importante, que es el de generar agua confiable y de proporción elevada para agricultura, industrias y abastecimiento a (grandes) ciudades (Buytaert et al. 2004; Díaz-Granados et al., 2005), por ejemplo: 2'239.191 habitantes de Quito (INEC, 2010), se abastecen de agua gracias a los páramos de la Reserva Ecológica Cayambe–Coca y la Reserva Ecológica Antisana con sus proyectos Papallacta Integrado y Mica dotan de aproximadamente 3000 l/s (EPMAPS, 2016); Cuenca, por su lado, con 505.585 habitantes (INEC, 2010), se suministra de agua del Parque Nacional Cajas y en general de la Reserva de la Biósfera Macizo del Cajas, el agua llega a los ríos Tomebamba, Machángara y Yanuncay, los dos primeros presentan captaciones de agua de 800 a 860l/s (Gualpa, 2013) y el río Yanuncay que es fuente principal de abastecimiento para la captación de agua de la planta de Sustag, cuya captación es de 460l/s; de esa manera en conjunto cubren el 96% del área urbana y 88% en el área rural (ETAPA-EP, 2016). Para Ambato desde el Cerro Casi Gana aporta con 220l/s para abasto de 329.856 personas (El Telégrafo, 2014).

La topografía del páramo es adaptable para la construcción de presas que alimentan a centrales de generación de energía hidroeléctrica, ya que sus fiables flujos base garantizan una generación constante (Gualpa, 2013); por ejemplo

“Coca Codo Sinclair”, el proyecto hidroeléctrico más grande del Ecuador, ubicado en las Provincias de Napo y Sucumbíos, lugar donde el abastecimiento de agua es de gran magnitud debido a la cuenca del Río Coca, la cuenca está envuelta con elevaciones como el Cayambe y Antisana. Coca Codo cubrirá el 30% de la demanda energética del país, generando 1.500 MW (Almeida, 2009). Las presas de Amaluza y Sopladora pertenecientes a la cuenca del Río Paute se dotan de agua que desciende desde el ecosistema páramo en la Cordillera Occidental y Central., las mismas tienen una capacidad de 1075 MW y 487MW de potencia respectivamente (Buytaert et al., 2004; Ministerio de Electricidad y Energía Renovable, 2016). El proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco ubicado en las provincias de Azuay y El Oro, el agua proviene desde la cuenca Alta y Media Baja del Río Jubones, siendo afluente a éste la microcuenca del Río Zhuruca (CELEC EP, 2016; Jaramillo, 2011), Minas San Francisco brindará energía a cantones de Pucará, Santa Isabel, Pasaje y Zaruma (CELEC EP, 2016).

El páramo, ecosistema indispensable para la vida por sus múltiples beneficios, siendo el agua base de investigación por el ser humano, encaminado hacia la hidrología que se torna esencial para un bienestar ambiental, económico y social con mira hacia las nuevas generaciones.

La hidrología es una de las ciencias de la tierra. Su objetivo es el estudio científico del agua, considerándola columna vertebral de la gestión de cuencas hidrográficas, encargándose de la correcta distribución y circulación del agua en la atmósfera y en la corteza terrestre, sus propiedades físicas, químicas, y su relación con el ambiente, incluyendo los seres vivos; siendo el ciclo hidrológico apropiado para describir la ciencia, implicando en él procesos como: Precipitación, Intercepción, Evaporación, Transpiración, Evapotranspiración, Infiltración y Escorrentía (Llambí et al., 2012). En los Andes y especialmente en los páramos se ha profundizado el conocimiento de procesos hidrológicos realizando en los últimos años múltiples investigaciones: (Llambí et al., 2012) expresan que las precipitaciones pueden darse en forma de nieve o granizo, lluvia y llovizna, esto no quiere decir que sea constante, más bien (Buytaert et al.

2004; Padrón et al. 2015) afirman que la precipitación varía de acuerdo al tiempo y al espacio. Las tempestades de alta frecuencia son sustancialmente abstraídas por intercepción; contrariamente la intercepción es pequeña cuando existen tormentas de alta intensidad y baja frecuencia (Ponce, 1989). La vegetación es idónea para la intercepción del agua de la lluvia, comúnmente al reemplazar la cobertura forestal nativa por pastos y cultivos, afectan el régimen hidrológico de las cuencas de alta montaña, debido a cambios en las propiedades hidrofísicas del suelo, como: la infiltración y capacidad de retención de agua; (Turner et al. 1996); (Buytaert et al., 2004) indican que la intercepción pese a ser un proceso del ciclo hidrológico muy importante para los páramos no se monitorea o se estudia detalladamente. La evapotranspiración es uno de los parámetros más importantes en el balance hídrico, pero es uno de los menos estudiado por la poca disponibilidad de datos de calidad; resultado de eso existe un escaso conocimiento de sus características, variabilidad temporal y la sensibilidad a las variables meteorológicas que son fundamentales para su cálculo (Córdova, 2013). El dominio de infiltración está directamente relacionado con el comportamiento del agua en los ecosistemas de montaña, ya que regula la escorrentía (Podwojewski & Poulenard, 2000; Ponce, 1989), (Buytaert et al., 2004) manifiestan que la infiltración en los Andosoles es excelente, mientras que un suelo compactado disminuye la infiltración y aumenta la escorrentía superficial. La escorrentía para llegar a su cauce final puede ingresar como superficial, subsuperficial o subterráneo (Llambí et al., 2012). Sin embargo, conocer el aporte que desemboca en el caudal final mediante experimentación es casi imposible por la dificultad de medir la cantidad de agua en campo; de acuerdo a eso, (Plesca et al., 2012) confirman que para capturar la escorrentía y evaluar cada uno de los procesos del ciclo hidrológico es necesario implementar modelos hidrológicos. De ésta manera se conocen resultados óptimos y precisos para interpretar la regulación y rendimiento hídrico y así poder manejar adecuadamente los efectos de cambio climático y el cambio de uso de tierra, consecuentes de actividades antrópicas; enfrentar estas situaciones es un paso a mejorar, y actuar oportunamente es prioritario.

Los modelos hidrológicos tienen como objetivo primordial representar los procesos que conforman el ciclo hidrológico y la interrelación entre las variables que influyen en el mismo. Particularmente los modelos se desarrollan directamente para estudiar el impacto del cambio de uso de suelo y clima (Ewen & Parkin, 1996; Orduña, 2007). En las últimas décadas se ha mejorado significativamente los modelos hidrológicos, aunque con un grado más de dificultad; pese a ello para obtener unos resultados óptimos de calibración y validación depende de un ingreso de datos precisos y de buena calidad, aunque a su vez ellos también dependen de aspectos como: captura de datos y precisión de sensores. (Céleri & Feyen, 2009; Gualpa & Céleri, 2013). Los modelos hidrológicos se pueden clasificar de acuerdo a las características de interés: **i) Representación espacial:** Modelos Agregados: considera una distribución espacial uniforme de lluvia en la cuenca y supone que los procesos hidrológicos son constantes y globales para toda la cuenca. Modelos Distribuidos: incorporan la variabilidad espacial de la lluvia y de los parámetros dividiendo la cuenca en celdas, en las que se simulan los diferentes procesos hidrológicos. Modelos Semidistribuidos: permiten cierta variabilidad espacial de lluvia, divide una cuenca en múltiples subcuencas con lluvia y parámetros constantes para cada una. **ii) Representación de los procesos hidrológicos:** Modelos métricos: No necesita conocimiento de estructura ni parámetros de la cuenca, tan solo datos de entrada y salida y su resultado es característico de la cuenca sin interpretación física. Modelos conceptuales: representa conceptualmente los procesos hidrológicos más importantes, basándose en reservorios o depósitos de agua conectados que se llenan con lluvia o infiltración y se vacían mediante, evapotranspiración o escorrentía, permitiendo generar secuencias continuas de flujo cuyos parámetros deben ser observados en la cuenca. **iii) Extensión temporal:** Modelos de episodio: utilizados para simulaciones de un único episodio de lluvia, se ajustan a la evaluación de la escorrentía directa, sin tomar en cuenta el proceso de recuperación de humedad entre episodios de lluvia. Modelos continuos: simulan caudales diarios, mensuales o estacionarios; considera una generación de escorrentía directa, subterránea, centrándose en la simulación de evapotranspiración y de los procesos a largo plazo para

recuperar de la humedad durante los periodos que no hay ocurrencia de precipitación (Medina & Galindo, 2009; Orduña, 2007).

Mundialmente se han aplicado modelos hidrológicos en diferentes ecosistemas, por ejemplo: (Cabrera, 2011; Finger, et al., 2015) se encargan de aplicar modelos semidistribuidos como el HBV - light y (Cortés, 2010) como el modelo WEAP, todos ellos se centraron en sus estudios en áreas de alta montaña ubicados en España, Suiza y Chile respectivamente, dónde su principal y vital interés es calcular la contribución de nieve, glaciares y lluvia de sus ecosistemas para evaluar los recursos hídricos de manera que se pueda conocer el aporte superficial y subsuperficial del agua que llegará y ayudará al abastecimiento de la población. Los ecosistemas boscosos son tomados en cuenta también para implementar al Sur del Ecuador modelos hidrológicos. Es así que lo manifiestan (Plesca et al., 2012) que aplicaron varios modelos semidistribuidos: HBV-light, HEC-HMS, CHIMP, SWAT, LASCAM) y un modelo totalmente distribuido (HBV-N-D), con la finalidad de simular la esorrentía diaria en el área, para futuras implementaciones ingenieriles. En los páramos se han implementado modelos hidrológicos, especialmente semistribuidos; así: (Buytaert et al. 2005; Parra 2016) realizaron investigaciones en la cuenca del Río Machángara localizada al noreste de la ciudad de Cuenca al sur del Ecuador, concentrándose en analizar los procesos físicos de la hidrología utilizando procedimientos de sensibilidad para simular la gestión del recurso hídrico, sus estudios fueron realizados con modelos hidrológicos como TOPMODEL y WEAP.

Uno de los temas que no ha sido abordado hasta ahora es la identificación de las bondades y problemas de un modelo hidrológico que pueda ser utilizado en varios tipos de estudios hidrológicos en el páramo. Como bien se analizó la implementación de varios modelos hidrológicos en algunas partes del mundo y diferentes ecosistemas, se encontró que el modelo hidrológico HBV – light ha sido aplicado exitosamente en varios ecosistemas de montaña. Sin embargo, dicho modelo no registra estudios en zonas de páramo, ni mucho menos investigaciones donde se aplique el modelo HBV – light agregado y semistribuido en un solo estudio, obviamente siempre habrá posiciones a favor

de uno de los tipos de métodos, pero es experimentable y factible para adaptarlo a nuestra zona de estudio, ya que presenta características como: agregado y semidistribuido, lo que nos permitirá estudiar la cuenca completa o dividirla en varias subcuencas y clasificar sus zonas de vegetación; conceptual ya que destaca su representación hidrológica (reservorios) con parámetros observables; continuo por la simulación durante intervalos de tiempo mayores a un solo episodio de lluvia (J. Seibert & Vis, 2012). Al ser HBV – light un modelo novedoso en aplicaciones de ecosistemas páramo implementarlo se convierte en un reto, pero nos proporcionará una satisfacción al conocer sus resultados para brindar apoyo y cuidado tanto al recurso hídrico como a personas que se desenvuelven alrededor del mismo.

OBJETIVOS

Objetivo General:

Evaluar el desempeño del modelo hidrológico HBV - light en la microcuenca del río Zhurucay.

Objetivos Específicos:

- Calibrar y validar del modelo HBV - light.
- Evaluar el desempeño del modelo HBV - light.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del área de estudio e instrumentación

El área de estudio es el Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay. Está ubicado al Suroeste de la República del Ecuador, en la parte central de la Provincia del Azuay, sobre las jurisdicciones cantonales de Girón y San Fernando, en las parroquias San Gerardo y Chumblín (Mosquera et al. 2013; Padrón 2013). Cuenta con un área de 7.53 Km² y una altitud que varía desde los 3495 a los 3900 m s.n.m. (Padrón, 2013).

El Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay está conformado por una red de monitoreo anidada que consta de ocho cuencas (0.20 - 7.53Km²), donde S1 a S7 son afluentes de S8 (Figura1); además presenta estaciones meteorológicas que nos benefician con datos de velocidad y dirección del viento (veleta y anemómetro), radiación solar (piranómetro), presión atmosférica (barómetro), temperatura y humedad relativa (sensor CS215) y precipitación (pluviómetros). Para los datos de precipitación se obtienen por medio de 5 pluviómetros, con registros cada 5 minutos. La temperatura se registra cada 5 minutos de acuerdo a los sensores ubicados en las estaciones. Los datos de caudal se obtienen gracias a los vertederos que están ubicados en puntos estratégicos del observatorio, siendo éstos de pared delgada hechos de hormigón y platina de metal, son de sección combinada (triangular y rectangular) y en cada uno de ellos están instalados transductores de presión para medir los niveles de agua para un registro de datos cada 5 minutos. Los datos de evapotranspiración de referencia se obtienen a partir de la velocidad del viento, radiación solar, temperatura y humedad del aire, siendo éstos necesarios para obtener los valores de evapotranspiración de referencia mediante la fórmula de Penman – Monteith. Para el desarrollo del estudio los datos de precipitación, temperatura, caudal y evapotranspiración de referencia se promediaron en escala diaria. (Córdova 2013; Guallpa 2013; Llambí et al. 2012; Ramón 2015).

Zhurucay consta con varios equipos y sensores que miden variables meteorológicas como: precipitaciones, flujos de energía y dinámica del agua del suelo a alta resolución temporal. Para los análisis de variables de calidad del

agua se monitorean isótopos estables, pH, conductividad eléctrica, nutrientes y metales; para ello se llevan a cabo campañas semanales y de muestreo selectivo para la recolección de precipitación, caudal y agua del suelo. La cuenca también está actualmente equipada con un sistema de covarianza de remolinos para registrar mediciones de dióxido de carbono, vapor de agua (evapotranspiración) y flujo de energía (Mosquera et al., 2016). Los caudales descendentes del río Zhurucay son de aporte al río Rircay, el mismo que es afluente del río Jubones, que drena hacia el Océano Pacífico (Mosquera et al., 2016).

El clima está influenciado desde el lado oeste por el régimen del Pacífico (Córdova, et al., 2013). El clima es generalmente frío y nublado, la presencia de lluvia es extremadamente variable ya que la intensidad es baja (como lloviznas) pero de alta frecuencia para la cuenca, es por ello que la lluvia anual puede ser de 1200mm aproximadamente (Padrón, 2013; Padrón et al., 2015). La cuenca presenta una temperatura media anual de 5.98°C, una humedad relativa promedio anual de 91.44%, la radiación solar llega a 13.90 MJ/m²*día y una velocidad del viento de 3.62 m s⁻¹ (Cordova, Carrillo-Rojas, Crespo, Wilcox, & Celleri, 2015).

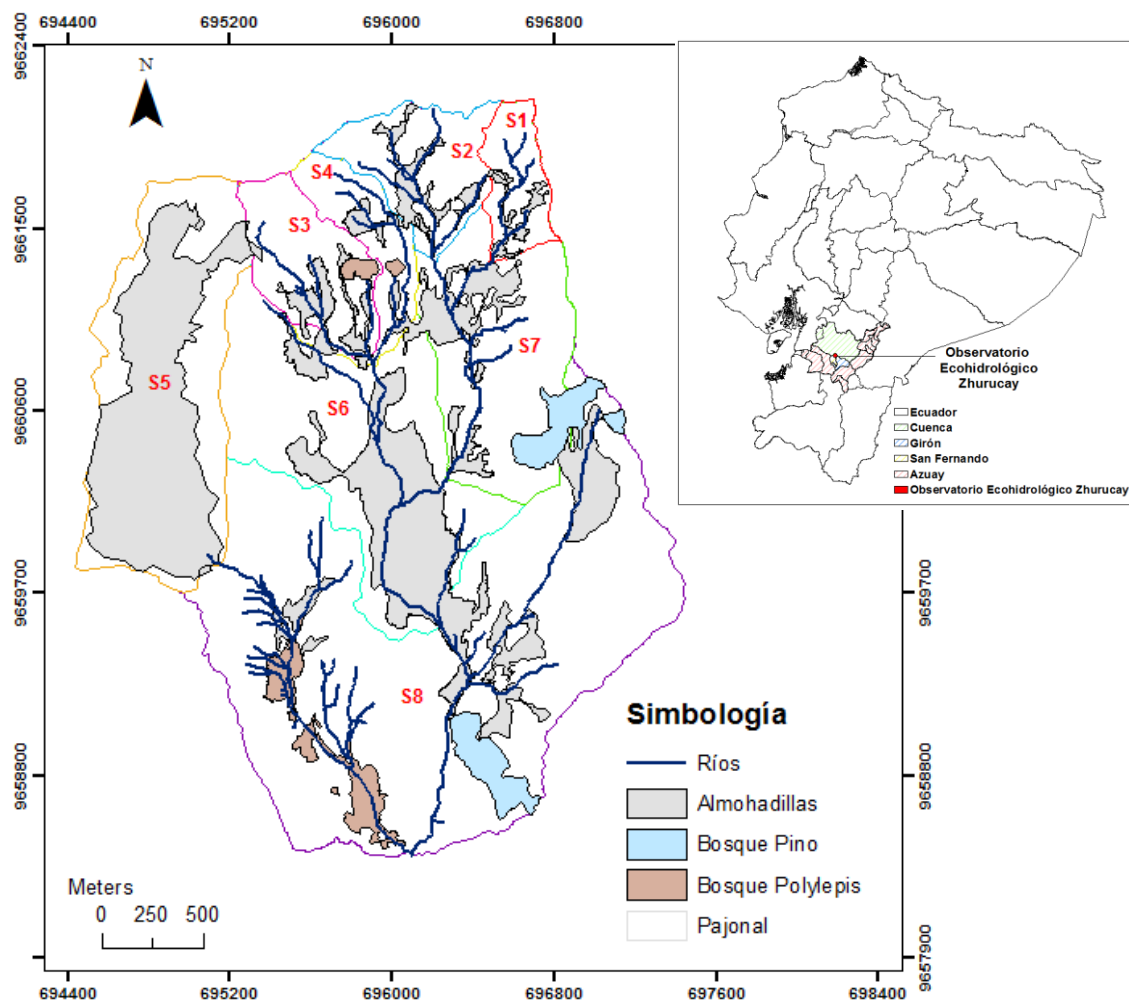
La geología de la cuenca se compone principalmente de depósitos de roca volcánica compactados por la actividad de la última era glacial, constando de varios tipos de formaciones como: la formación Turi que son brechas tobáceas primarias de composición andesítica, la formación Quimsacocha que abarca lavas y tobas y la formación Santa Isabel destacada por lavas y brechas tobáceas andesíticas (Albuja and Tenelanda 2014; Mosquera et al. 2013). La pendiente media dentro del observatorio es del 17%, aunque ciertas partes del lugar podrían ser tan pronunciadas como el 40% (Mosquera et al., 2016).

La cobertura vegetal se compone principalmente de: pajonal 78%, almohadillas 17%, bosque de pino 4% y bosque de Polylepis 1% (Albuja & Tenelanda, 2014); las dos especies últimas mencionadas no se consideran dentro del modelo hidrológico aplicado ya que no causará impacto alguno.

Los suelos están principalmente formados por Andosoles (73%), Histosoles (24%) y Leptosoles (3%); los primeros tienen gran capacidad para retener el

agua, lo cual se atribuye generalmente a la capacidad de regulación hídrica de estos ecosistemas y se localiza principalmente en las laderas de la cuenca; mientras que los Histosoles se encuentran en zonas saturadas en el fondo de los valles, cercano a los riachuelos, debido a su gran porcentaje de poros y densidad aparente baja, cuentan también con una extraordinaria capacidad de retención de agua y finalmente se encuentran los Leptosoles, que no son empleados en este caso de estudio por el bajo porcentaje que existe dentro del Observatorio (Albuja & Tenelanda, 2014; Mosquera et al., 2016).

Figura 1: Área de Estudio, cobertura vegetal e hidrografía.



WGS84 Zona 17 Sur

Elaborado por: Montalván M., 2017

Fuente: Departamento de Recurso Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca.

2.2 Datos

Para el estudio se requirió un periodo de datos desde 01 de Marzo de 2011 hasta 01 de Marzo de 2014. Se usó 1 estación meteorológica, 8 vertederos y 5 pluviómetros, para obtener series de tiempo diarias de caudales, precipitación, temperatura y evapotranspiración de referencia.

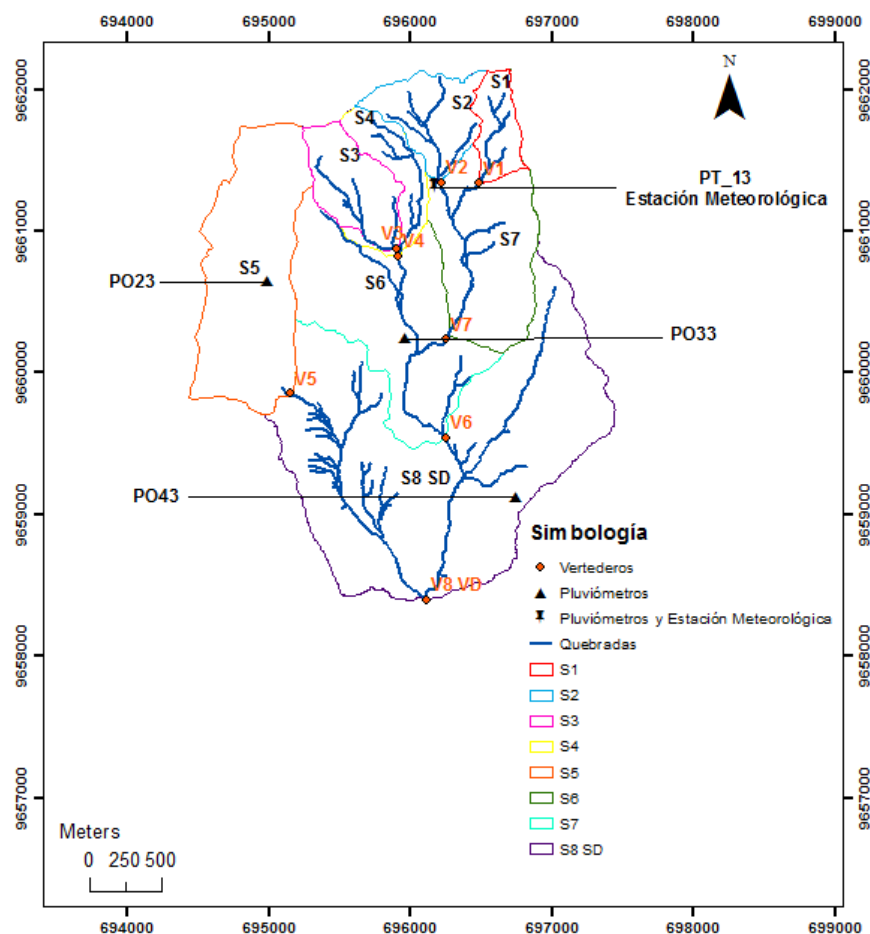
Como en el estudio se investiga la aplicación del modelo HBV – light tanto agregado como semidistribuido, los datos se usaron así: para analizar de manera agregada se consideró la cuenca del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay como una sola unidad hidrológica, a la que se denomina SD; por ello se utilizó 1 estación meteorológica (EM), 5 pluviómetros (P) y 1 vertedero (VD) (Tabla 1, Figura 2). Para el estudio semidistribuido se requirió de 8 subcuencas (S1 - S8), 1 estación meteorológica (EM), 5 pluviómetros (P) y 8 vertederos (V1 - V8) (Tabla 1, Figura 2).

Tabla 1: Diferentes materiales y datos que se implementarán en el estudio.

OBSERVATORIO ECOHIDROLÓGICO DE ZHURUCAY			
Cuenca Agregada			
Subcuencas	Pluviómetros	Vertederos	Estaciones Meteorológicas
SD	PT_02 PO_43 PO_33 PO_23 PT_13	VD	Estación Meteorológica
Cuenca Semidistribuida			
S1	PT_02	V1	Estación Meteorológica
S2	PO_43	V2	
S3	PO_33	V3	
S4	PO_23	V4	
S5	PT_13	V5	
S6		V6	
S7		V7	
S8		V8	

Descripción: PT_02: Estación Base, PO_43: Pozas, PO_33: Centro Cuenca Alta, PO_23: Lagunas Ciegas, PT_13: Estación Principal.

Figura 2: Ubicación de la estación meteorológica, pluviómetros y vertederos del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay.



WGS84 Zona 17 Sur

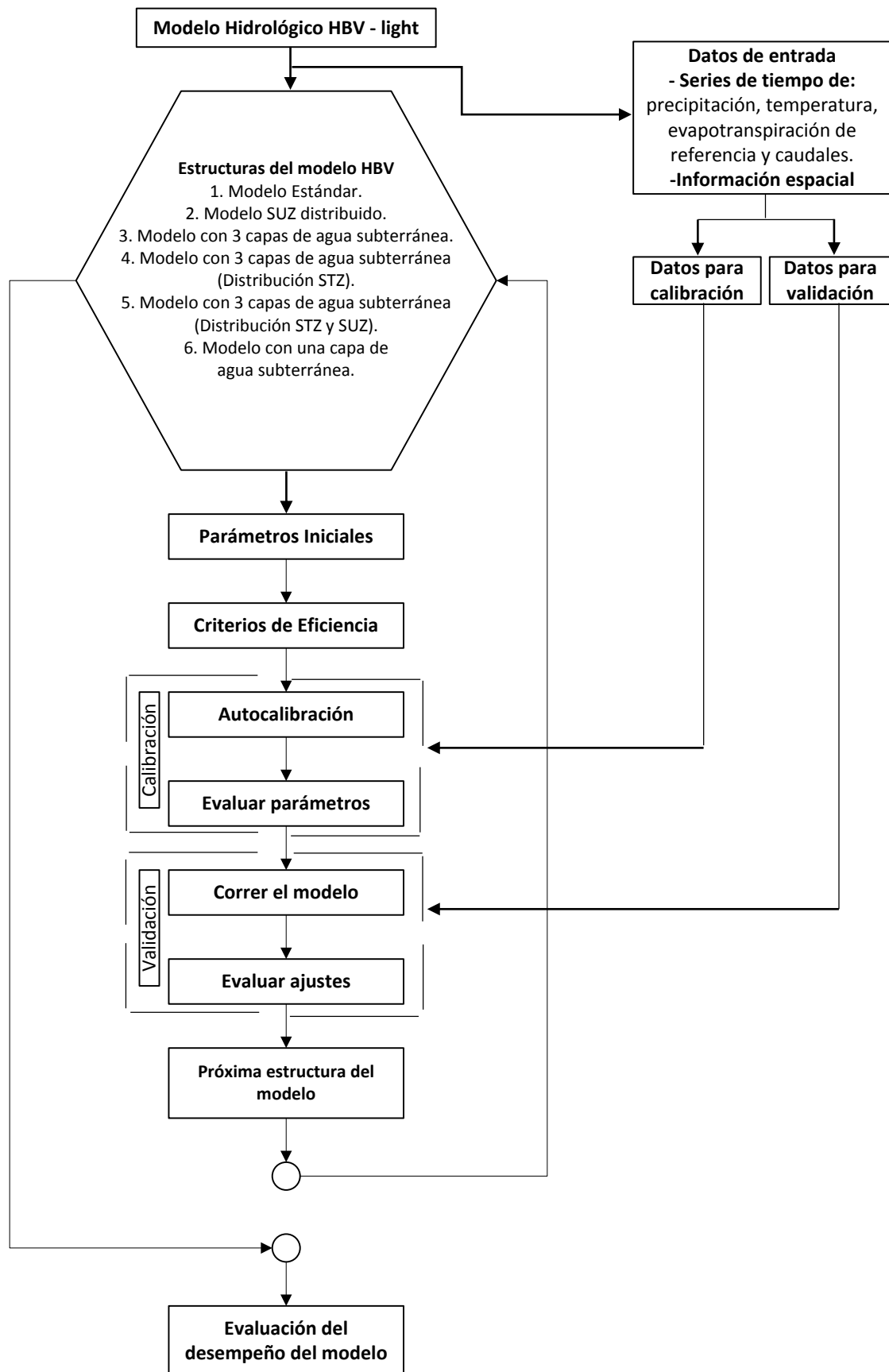
Elaborado por: Montalván M., 2017

Fuente: Departamento de Recurso Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca.

Nota: En la **Figura 2** no se muestra el pluviómetro PT_02 debido a la gran distancia aguas abajo que se localiza (a 2.50Km aproximadamente del pluviómetro PO_43), siendo además considerada para la excelente presentación del mapa.

2.3 Metodología General

Para describir la metodología se desarrolló un diagrama de flujo con su respectiva descripción y explicación que se presenta a continuación:



2.3.1 Modelo Hidrológico HBV – light

El modelo HBV - light es un modelo hidrológico que se puede aplicar tanto de manera agregado o semidistribuido; dicho modelo consta de varias rutinas que son: rutina de nieve, rutina de humedad del suelo, rutina de respuesta y rutina de enrutamiento. Debido a las condiciones climáticas que presenta nuestra zona de estudio no se aplica la rutina de nieve, es decir el Observatorio no presenta registros de nieve. HBV – light nos permite aplicar el modelo con diferentes estructuras, 8 en total (Anexo 1), que nos permitirá evaluar el modelo de mejor manera, siendo los datos de entrada diarios de lluvia, temperatura, caudal y evapotranspiración de referencia. El modelo HBV – light utiliza un período de warming – up, comúnmente llamado período de calentamiento, durante el cual las variables (humedad del suelo y caudales) evolucionan a partir de condiciones iniciales a sus valores apropiados a las condiciones meteorológicas y los valores de los parámetros. Es decir que después de este periodo de calentamiento el modelo debe representar la dinámica de la cuenca correctamente. (J. Seibert & Vis, 2012).

2.3.2 Datos de entrada

La serie de tiempo que se implementó para la aplicación del modelo HBV – light fue 01/03/2011 hasta 01/03/2014. De aquí se designó 1 año de periodo de tiempo para el respectivo warming – up que va desde el 01/03/2011 hasta 01/03/2012.

2.3.2.1 Datos para Calibración y Validación.

En la Tabla 2 se describen los datos que se utilizaron para cumplir con los objetivos.

Tabla 2: Datos usados para la calibración.

Período de tiempo para calibración: 02/03/2012 – 01/03/2013									
Modelo HBV – light Agregado									
S	Área (Km2)	Lluvia (mm)	T (°C)	ETo (mm/día)	Caudal (mm/año)	Cobertura Vegetal		Tipos de Suelo	
						AL	PJ	HS	AN
						(%)		(%)	
SD	7.53	1267.3	5.93	2.08	804.63	0.23	0.77	0.25	0.75

Modelo HBV – light Semidistribuido									
S	Área (Km2)	Lluvia (mm)	T (°C)	ETo (mm/día)	Caudal (mm/año)	Cobertura Vegetal		Tipos de Suelo	
						AL	PJ	HS	AN
						(%)		(%)	
S1	0.2	1308.09			693.00	0.15	0.85	0.14	0.86
S2	0.38	1309.73			722.29	0.18	0.82	0.16	0.84
S3	0.38	1277.84			868.73	0.18	0.82	0.18	0.82
S4	0.65	1287.74	5.93	2.08	813.11	0.18	0.82	0.22	0.78
S5	1.22	1224.24			635.51	0.63	0.37	0.61	0.39
S6	3.28	1258.55			984.75	0.09	0.91	0.24	0.76
S7	1.4	1289.76			767.59	0.17	0.83	0.21	0.79
S8	7.53	1267.30			804.63	0.25	0.75	0.27	0.73

Descripción: **S:** Subcuencas, **Área:** Área de cada subcuenca, **Lluvia:** Lluvia anual, **T:** Temperatura promedio anual, **ETo:** Evapotranspiración de referencia promedio anual, **Caudal:** Caudal anual, **AL:** Almohadillas, **PJ:** Pajonal, **HS:** Histosoles, **AN:** Andosoles.

La obtención de los valores necesarios fueron facilitados por IDRHICA (Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales de la Universidad de Cuenca), excepto para lluvia espacial que fue calculado por la autora a partir de los datos de los 5 pluviómetros en base a la interpolación aplicando el método IDW (Inverse distance weighted), método de ponderado por el inverso de la distancia. Éste método fue previamente aplicado en el Observatorio Ecohidrológico Zhurucay por (Seminario, 2016), quién realizó el análisis de varios métodos de interpolación, siendo el mejor método IDW.

Los datos que se aplican para validación son los mismos utilizados en la calibración del Modelo HBV – light agregado y semistribuido (Tabla 2); existiendo tan solo un cambio en el período de tiempo, que va desde 02/03/2013 hasta 01/03/2014.

2.3.3 Estructura del modelo HBV - light

El modelo HBV – light no está compuesto de una sola estructura, más bien puede llegar a tener hasta 8 diferentes estructuras. Las estructuras pueden ser: desde una muy simple que consta de una entrada de agua con dos capas de agua subterránea, y dos salidas de flujo; hasta una estructura muy compleja que presenta 3 entradas diferentes de agua con 3 capas de agua subterránea y 3 salidas de caudal. El detalle de cada una de las 8 estructuras se encuentra en el Anexo 1. El fin de analizar cada estructura es conocer con cuál de ellas la simulación se asemeja de mejor manera a la observación.

2.3.4 Parámetros Iniciales

En la Tabla 3 se menciona los parámetros aplicados en los procesos de calibración, validación y evaluación del modelo, siendo los mismos parámetros para analizar nuestra zona de estudio de manera agregada o semidistribuida. Cada parámetro es adaptable a su propia estructura (Anexo 2).

Tabla 3: Parámetros para el desarrollo del modelo.

PARÁMETROS DEL MODELO HBV - light	
FC	Máxima humedad almacenada en el suelo de la cuenca (mm)
LP	Humedad del suelo por encima de la cual ET actual alcanza la ET potencial (mm)
BETA	Parámetro que determina la contribución relativa a la escorrentía de la lluvia
PERC	Agua que penetra las capas profundas (mm)
ALPHA	Coeficiente de no linealidad
UZL	Límite de almacenamiento del reservorio (mm)
K0, K1, K2	Constantes de recesión (1/día)
MAXBAS	Longitud de la función de ponderación triangular (Δt)

Para un conocimiento más detallado, la información se puede encontrar en (J. Seibert & Vis, 2012; Jan Seibert, 2005).

2.3.5 Criterios de Eficiencia

Dentro del modelo HBV – light existen varios criterios de eficiencia que analizan con el fin de cuantificar la bondad del ajuste del modelo y de esta manera evaluar la capacidad predictiva del modelo. Sin embargo y conforme a las revisiones bibliográficas que se analizó, se optó por analizar mediante la optimización de 3 índices: Optimización de Nash – Sutcliffe, Optimización de Nash – In y Optimización de Sesgo Relativo Bias.

Optimización de Nash-Sutcliffe: siendo éste uno de las medidas de bondad más empleadas en Hidrología. Los parámetros calibrados y validados óptimos en función de este índice tienden a representar lo mejor posible los picos altos (caudales elevados) mientras que los bajos tiende a subestimarlos (Ecuación 1), Los valores de Nash-Sutcliffe comprenden rangos de $-\infty$ y 1. La modelación es perfecta cuando Nash-Sutcliffe=1 mientras que Nash-Sutcliffe=0 cuando los resultados de la modelación se corresponden con la media de los valores observados.

Optimización de Nash-In (Logarítmico): es empleado cuando los valores de la media modelada son demasiados grandes, es decir que toma importancia cuanto mayor es la cantidad de caudales bajos (Ecuación 2). La valoración del ajuste se lo realiza con el mismo criterio empleado en el Índice de Nash-Sutcliffe.

Optimización de Sesgo Relativo Bias: es una medida que indica la tendencia promedio de los datos simulados a ser mayores o menores que los datos observados, es decir para reflejar la sistemática del modelo para la sub o sobre - producción de caudales (Ecuación 3). Para Bias un valor de 0 indica un ajuste perfecto, en su ecuación se indica un resultado anual.

Coeficiente de Determinación (R^2): es la medida de qué tan bien los caudales modelados se asemejan a los observados. Un modelo es más eficiente cuando R^2 es más cercano a 1 (Ecuación 4) (Albuja & Tenelanda, 2014; Chuquín, 2016; Krause & Boyle, 2005).

$$\text{Nash Sutcliffe} = 1 - \frac{\sum(Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})^2}{\sum(Q_{\text{obs}} - \bar{Q}_{\text{obs}})^2} \quad (1)$$

$$\text{Nash - In} = 1 - \frac{\sum(\ln Q_{\text{obs}} - \ln Q_{\text{sim}})^2}{\sum(\ln Q_{\text{obs}} - \ln \bar{Q}_{\text{obs}})^2} \quad (2)$$

$$\text{Bias} = \frac{\sum(Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})}{n} \quad (3)$$

$$R^2 = \frac{(\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}}))^2}{\sum(Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum(Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (4)$$

2.3.6 Calibración

2.3.6.1 Autocalibración

Monte Carlo es el método de autocalibración que se encuentra dentro de las aplicaciones del modelo. Este método genera una cantidad de conjuntos de parámetros escogidos aleatoriamente dentro de un rango de valores previamente establecidos (Beven, 2012; Zambrano, 2010). La Tabla 4 indica los rangos de valores usados para autocalibración.

Tabla 4: Límite de los parámetros que son sometidos a calibración.

Parámetros sometidos a calibración			
		Límite inferior	Límite superior
Rutina de Humedad del Suelo	FC	100	350
	LP	0	1
	BETA	0.1	5
	PERC	0.1	4
	ALPHA	0	1
Rutina de Respuesta	UZL	50	150
	K0	0.083	0.99
	K1	0.33	0.99
	K2	0.005	0.1
Rutina de Enrutamiento	MAXBAS	1	1.5

Nota: Los valores del límite superior e inferior de los parámetros son los mismos que se aplicó en la calibración del modelo agregado y semistribuido.

2.3.6.2 Evaluar parámetros

Después de la calibración, para seleccionar el mejor set de parámetros se evalúa de acuerdo a la optimización de los criterios de eficiencia descritos en la sección anterior (2.3.5). Primero se optimiza para Nash – Sutcliffe acompañado con los valores de los otros índices (Nash – In y Sesgo Relativo Bias) para conseguir los valores de los parámetros que serán colocados en el modelo. Segundo, optimizo para Nash - In con los valores de los otros índices y valores de los parámetros. Finalmente se optimiza para Sesgo Relativo Bias conjuntamente con los valores de los otros índices de eficiencia y así obtener los valores de parámetros para el modelo.

2.3.7 Validación

2.3.7.1 Correr el Modelo

Los valores obtenidos en la autocalibración se utilizan para correr el modelo con nuevos datos, no utilizados en la calibración. De esta manera se evalúa si el modelo puede simular condiciones climáticas diferentes a las encontradas en la calibración. De esa manera se obtendrá como resultado la determinación de la bondad del modelo para la cuenca.

2.3.7.2 Evaluar Ajustes

Al igual que la calibración se debe analizar los resultados de la validación mediante índices de eficiencia (Sección 2.3.5) y así conocer la precisión y rendimiento del modelo que se aplicará a investigaciones y estudios futuros.

2.3.8 Próxima estructura del modelo

La calibración y validación se aplicará para todas y cada una de las estructuras del modelo que se mencionó en el Anexo 1 para que de esa manera se adapten los valores a cada una de ellas y su funcionamiento. Se aplica la misma metodología para la aplicación del modelo HBV – light agregado y semidistribuido.

2.3.9 Evaluación del desempeño del modelo

Los criterios de eficiencia en conjunto nos permiten conocer la mejor estructura que se adapta al Observatorio Ecohidrológico de Zhurucay, ya que gracias a ellos se conoce el caudal pico, caudal base y la salida de la cantidad de agua al final de la cuenca que son los objetivos propuestos al inicio de la investigación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Caracterización de la lluvia del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay

Al analizar los datos para construir los diferentes modelos hidrológicos HBV – light para este estudio se conocieron ciertas características del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay. Por ejemplo, si bien se mencionó en la sección 2.1 la cantidad de lluvia anual, ahora podemos mostrar con exactitud los resultados de todos los pluviómetros que se utilizaron en el estudio. Los resultados se describen en la Tabla 5.

Tabla 5: Lluvia anual de los pluviómetros ubicados en el Observatorio.

Pluviómetros	Lluvia anual (mm)
PT_02	1361.88
PO_43	1290.89
PO_33	1083.02
PO_23	1060.30
PT_13	1224.98

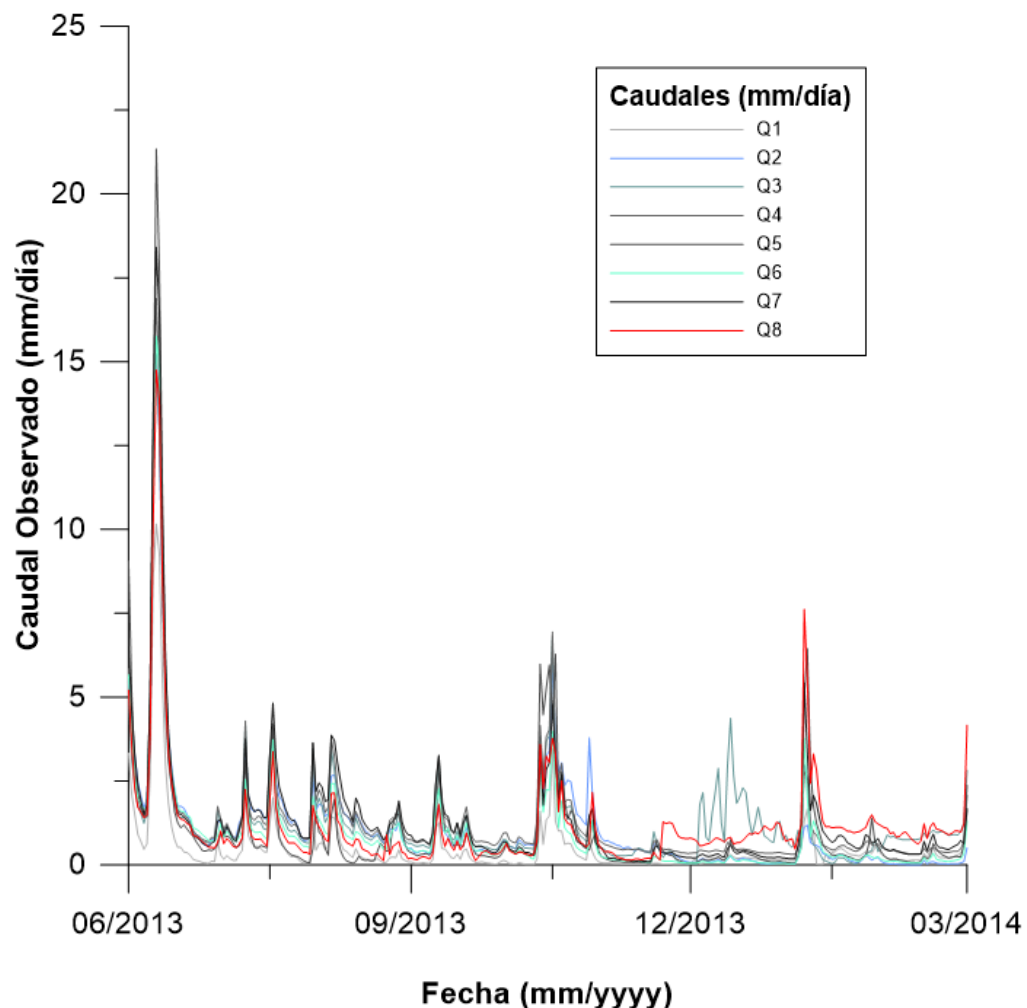
Descripción: **PT_02:** Estación Base, **PO_43:** Pozas, **PO_33:** Centro Cuenca Alta, **PO_23:** Lagunas Ciegas, **PT_13:** Estación Principal.

Por medio de la Tabla 5 se puede observar que existe una alta variabilidad espacial de la lluvia. El pluviómetro con mayor cantidad de registro de lluvia es el PT_02 que está ubicado en la estación base, en la parte más baja del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay, mientras que el que registra menor cantidad de lluvia es el PO_23 (Lagunas Ciegas), ubicado en la parte oeste de Zhurucay. Existe una diferencia de 301.58 mm de lluvia anual entre el mayor y menor registro de lluvia de los pluviómetros. Ésta diferencia equivale a aproximadamente un 30% de lluvia. Este valor es importante para los registros de lluvia que se presentan en Zhurucay. La instalación de varios pluviómetros en el Observatorio son fundamentales ya que de no haber mantenido este denso monitoreo se pudo haber tenido un error de +/- 30% en el balance hidrológico, y esto hubiese llevado a un error en todo el proceso de modelación del estudio.

3.2 Resultados de problemas encontrados.

Los modelos hidrológicos a medida que se van investigando y aplicando en diferentes lugares, con diferentes períodos de calibración y validación, nos permiten también realizar un análisis de datos, y es lo que precisamente se realizó. De esta manera se detectó un problema que afectaba a la validación en el período de Junio 2013 hasta finalizar el tiempo de validación Marzo 2014. Se indicará en la siguiente figura la complicación que se presentó:

Figura 3: Datos de caudales específicos usados en la validación.



Elaborado por: Montalván M., 2017

Por medio de la Figura 3 se detectó un comportamiento extraño que presentaba la validación del modelo hidrológico HBV – light. Si nos concentramos en el caudal 8 (línea de color rojo) podemos observar que existe un imperfecto en su dinámica desde fines de 11/2013, ya que se observa que (i) la variabilidad no es similar a la del resto de subcuencas, mostrando incrementos paulatinos y sostenidos de caudales, y (ii) la magnitud del caudal específico no se explica con la existente en el resto de cauces, en los cuales la magnitud es muy semejante. Se estima que pudo haber existido alguna intervención con el sensor del vertedero, ya que físicamente es imposible que la cuenca responda de esta manera, ya que lo normal sería un ascenso y descenso rápido de caudal. Debido a este problema no se tomará en cuenta la información errónea para validar el modelo. Sin embargo en las Figuras se mantiene el período completo (Junio 2013 – Marzo 2014), para que se aprecie el problema que se encontró y cómo la simulación discrepaba de las observaciones.

Se detectó dicho error en los resultados de validación gracias a la modelación, siendo esto una referencia de positivismo al momento de realizar investigaciones y estudios de modelación hidrológica.

3.3 Resultados del Modelo HBV – light agregado y semistribuido.

Los resultados nos darán a conocer de acuerdo a la calibración y validación qué estructura se adapta mejor al Observatorio Ecohidrológico Zhurucay, y si es el modelo HBV - light agregado o semistribuido.

Las Tablas que se mostrarán en esta sección, nos indicarán mediante la Optimización de Nash-Sutcliffe, Nash–In (Logarítmico) y Sesgo Relativo Bias respectivamente cuáles son las mejores estructuras de calibración y validación para el Observatorio.

Cada Figura que se mostrará en los resultados contiene 3 figuras internas que nos ayudan a la interpretación y entendimiento. La primera figura es un hidrograma que muestra los caudales observados (línea azul) y los caudales simulados (línea roja), si estas dos líneas están muy cerca indica un ajuste bueno calibración y validación para la respectiva evaluación de flujos rápidos, medios y/o lentos de la cuenca en estudio. La segunda figura es una dispersión que nos muestra qué tan buena o mala es la información obtenida mediante la relación que existe entre los caudales observados (eje X) y los caudales simulados (eje Y). Finalmente la tercera figura representa el balance de agua que tiene la cuenca; mientras el caudal simulado acumulado (línea roja) sea más próxima al caudal observado acumulado (línea azul), mejor será el balance hidrológico, siendo la misma cantidad de agua que entra y sale de la cuenca; caso contrario, se detectará una subestimación o sobrestimación de flujo de agua.

3.3.1 Resultados de Calibración y Validación para el Modelo HBV – light agregado.

3.3.1.1 Optimizado por Nash – Sutcliffe.

La Tabla 6 mediante la Optimización de Nash – Sutcliffe nos indica que las dos estructuras son las mejores, teniendo para las estructuras valores de 0.88. Si analizamos tanto Nash – Sutcliffe como los demás índices para calibración, observamos que la mejor estructura es el Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica). Para validación, los valores de los índices también indican que la mejor estructura es la misma de calibración. Sin embargo si se analiza conjuntamente las dos estructuras con todos sus índices se puede decir que los resultados son casi iguales, ya que numéricamente se diferencian muy poco.

Tabla 6: Valores de los índices de eficiencia optimizado por Nash – Sutcliffe.

CALIBRACIÓN					VALIDACIÓN			
OPTIMIZADO POR NASH - SUTCLIFFE								
Estructuras	Índices de Eficiencia				Índices de Eficiencia			
	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ)	0.88	0.82	0.90	96.64	0.70	0.19	0.74	121
Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica)	0.88	0.85	0.91	98.98	0.71	0.43	0.76	118

Para calibración por medio de Optimización de Nash – Sutcliffe se comparan las Figuras 4a) del modelo estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) y 5a) del modelo SUZ Distribuido Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica), para definir mediante el análisis visual la mejor estructura. La figura 5a) simula de mejor manera los picos altos y bajos. En cuanto a dispersión se comparan las Figuras 4b) y 5b), existiendo una menor dispersión de la Figura 5b), ya que sus puntos están más próximos a la bisectriz. Para balance hidrológico en las figuras 4c) y 5c) se identifica una sub – estimación de caudales, pero existe similitud entre las dos figuras. De acuerdo al análisis de las figuras en conjunto se puede decir que la mejor estructura es el Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica). Para validación, si comparamos las figuras 4d) y 5d), podemos observar que en la figura 5d) existe una mejor simulación de caudales. La dispersión de las figuras 4e) y 5e) representan una correlación no muy buena de caudales observados y simulados, debido a que sus puntos no están en la línea de bisectriz. El balance hidrológico se compara en las figuras 4f) y 5f), las mismas presentan una coincidencia del sesgo entre el observado y simulado. La validación nos permitió conocer que la mejor estructura es el Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica), de acuerdo a la observación que se realizó con las figuras. De esta manera la mejor estructura en la validación coincide con la mejor estructura de la calibración.

Figura 4: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) optimizado por Nash – Sutcliffe.

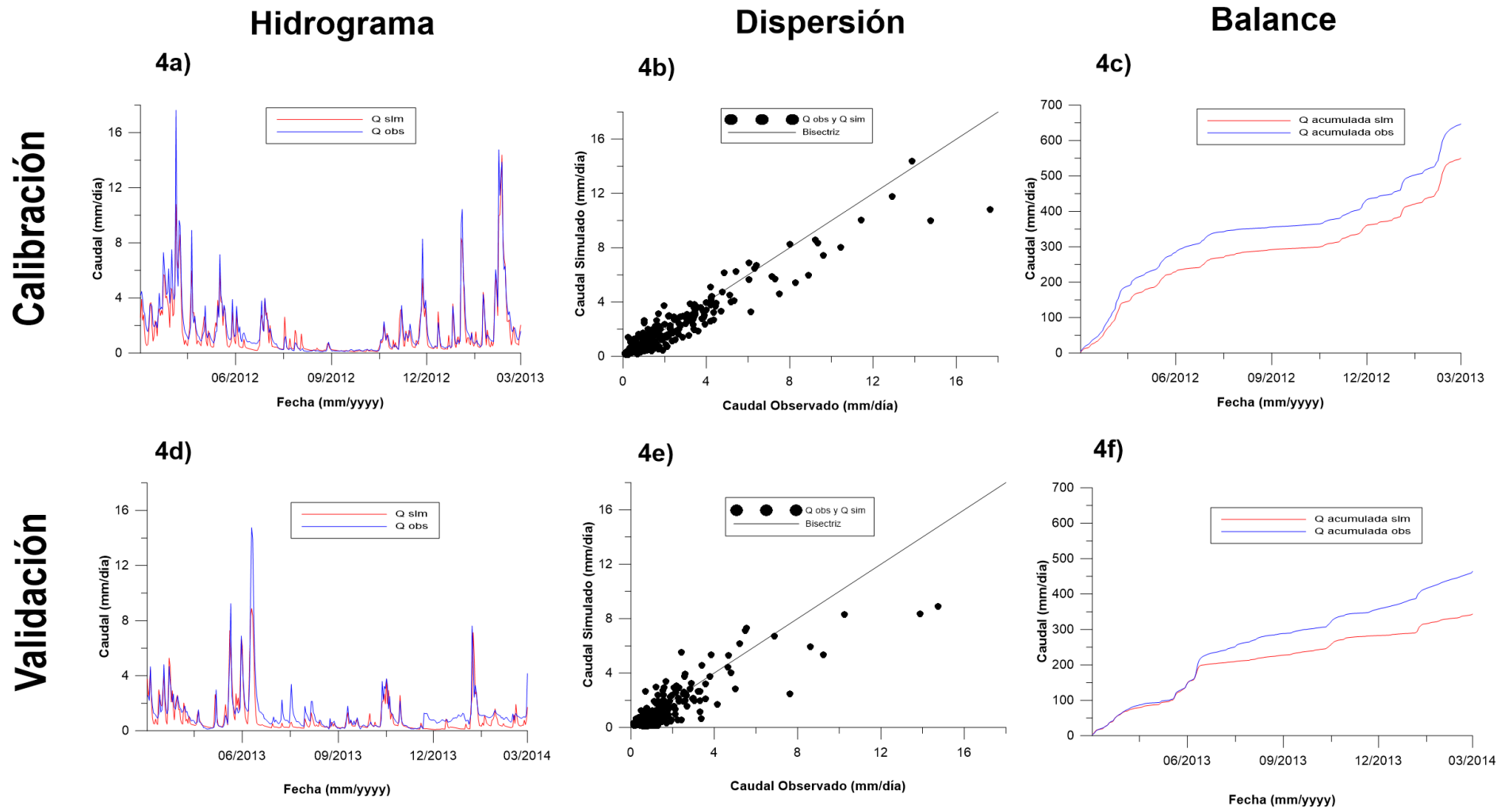
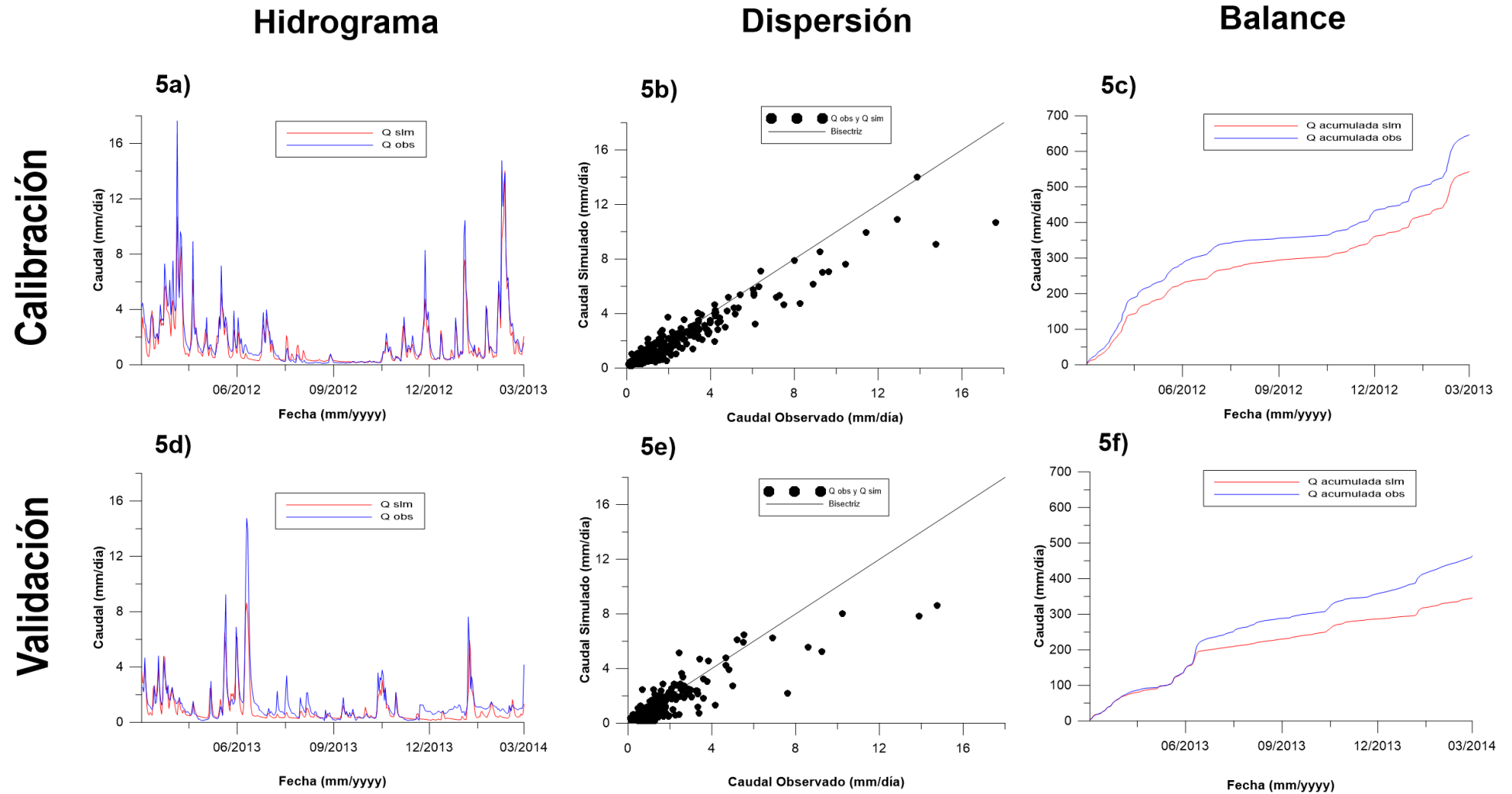


Figura 5: Calibración y Validación del Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica) optimizado por Nash – Sutcliffe.



3.3.1.2 Optimizado por Nash – In.

En Tabla 7 se exponen las 2 estructuras que obtuvieron los valores más altos de eficiencia cuando el modelo fue optimizado para Nash – In. Sin embargo, se puede observar en el Anexo 3 una adicional, similar a las dos estructuras que se evaluarán a continuación, pero no tan eficiente. El Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ) es la mejor estructura de acuerdo al valor de Optimización de Nash – In. Si evaluamos Nash – In con los otros índices de eficiencia para calibración podemos decir que el Modelo Estándar (Versión Básica) es la mejor estructura. Si realizamos el mismo análisis de los índices se observa que la mejor estructura es el Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ) para validación. Al analizar todos los indicadores en conjunto podemos decir que el Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ) es la estructura más eficiente, ya que numéricamente tiene una pequeña diferencia en relación a la otra estructura.

Tabla 7: Valores de los índices de eficiencia optimizado por Nash – In.

CALIBRACIÓN					VALIDACIÓN			
OPTIMIZADO POR NASH - IN								
Estructuras	Índices Estadísticos				Índices Estadísticos			
	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Modelo Estándar (Versión Básica)	0.86	0.84	0.91	88.91	0.69	0.47	0.76	124
Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ)	0.79	0.88	0.86	96.78	0.69	0.53	0.74	92

De acuerdo a la Optimización de Nash – In se realiza el análisis para calibración. Comparando las Figuras 6a) del Modelo Estándar (Versión Básica) y 7a) del Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ), se puede decir que la Figura 7a) tiene mejor representación de picos altos y bajos. Las figuras 6b) y 7b) representan la correlación que existe entre caudales observados y simulados, existiendo de mejor manera la correlación en la Figura 7b). El balance hídrico se compara en las Figuras 6c) y 7c), donde en las dos existe una sub – estimación de caudales simulados, pese a ello la Figura que representa mejor la comparación entre caudales es la Figura 7c). El resultado del análisis para calibración dio como mejor estructura el Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ). En cuanto a validación existe una mejor simulación de caudales picos y bajos en la Figura 7d) con respecto a la Figura 6d). La correlación de caudales observados y simulados para validación no es muy buena, es lo que indican las Figuras 6e) y 7e), donde sus puntos están alejados de la bisectriz. Para el balance hidrológico se comparan las Figuras 6f) y 7f), éstas indican un balance similar, al coincidir los caudales acumulados observados y modelados. Por el análisis que se hizo se puede decir que el Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ) fue la estructura que mejor representatividad tuvo, existiendo una mínima diferencia con la otra estructura.

Figura 6: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión Básica) optimizado por Nash – In.

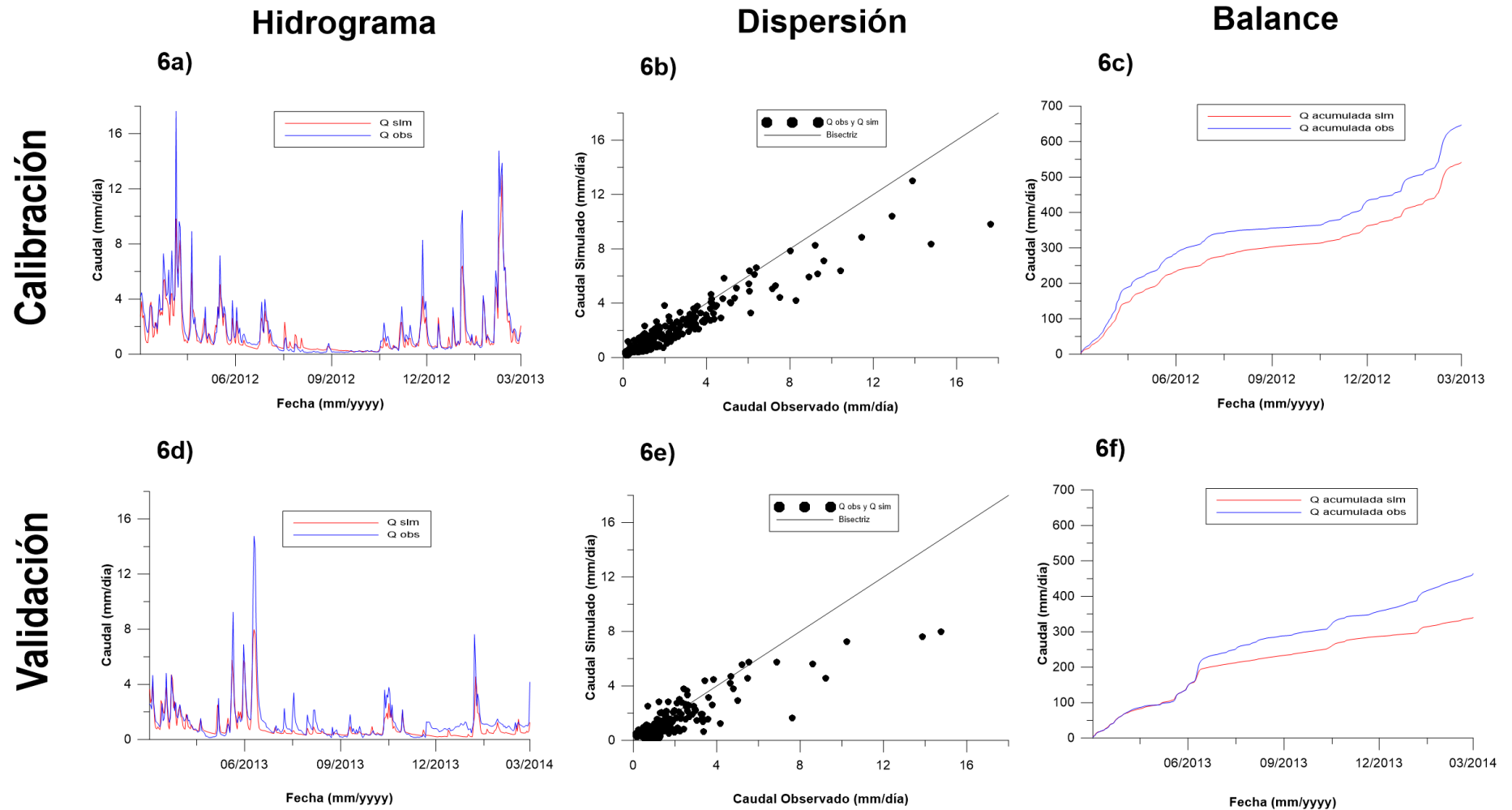
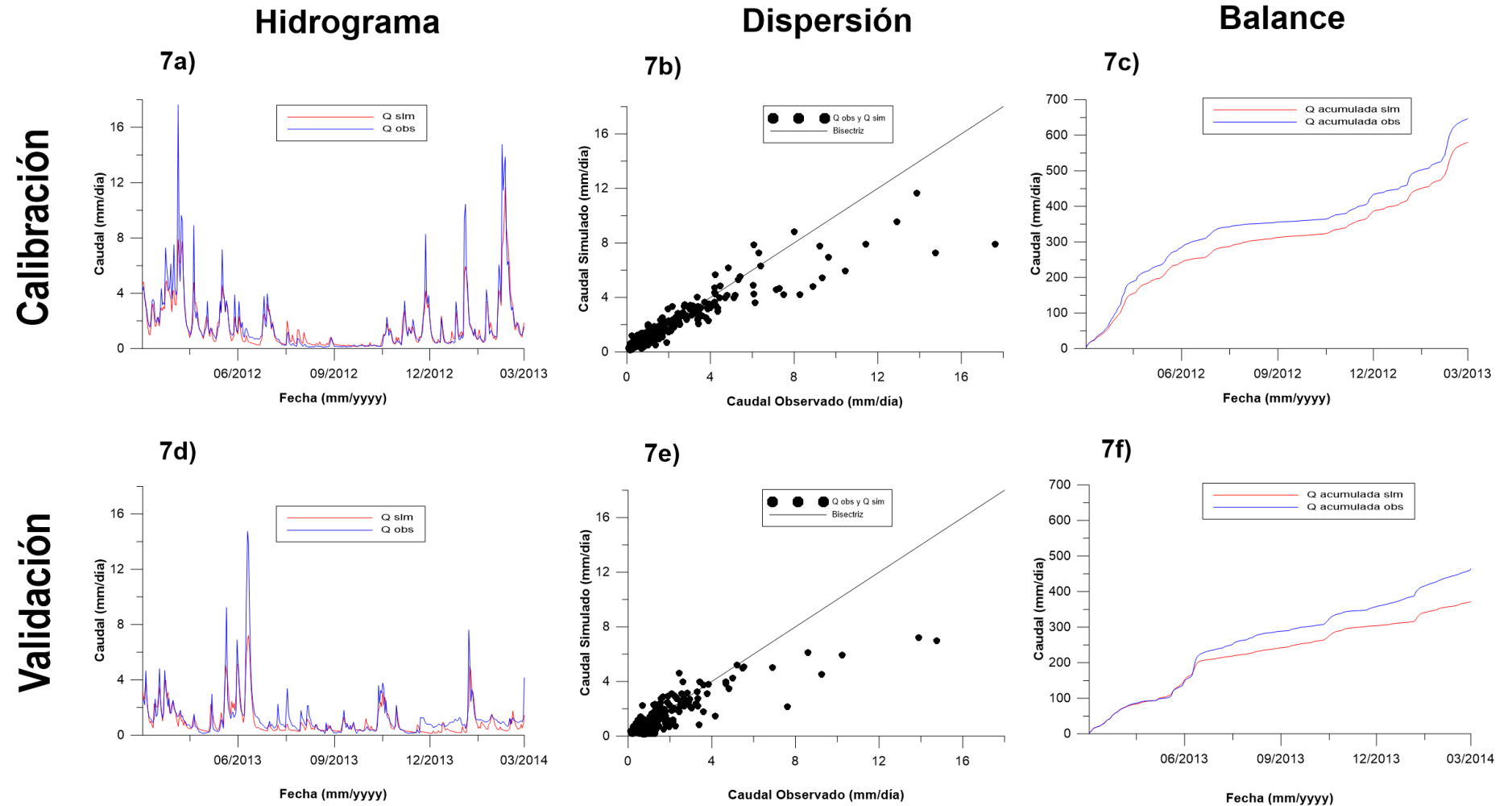


Figura 7: Calibración y Validación del Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ) optimizado por Nash – In.



3.3.1.3 Optimizado por Sesgo Relativo Bias.

La Tabla 8 contiene los valores resultantes de la Optimización de Sesgo Relativo Bias, indicándonos las dos mejores estructuras dentro del desarrollo de calibración y validación. En este caso existen 2 estructuras adicionales (Anexo 4) con valores también representativos, pero no tanto como los de las estructuras que se analiza en la Tabla 9. Para la optimización Sesgo Relativo Bias la mejor estructura fue el Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ), ya que el valor que indica el índice manifiesta que no hubo sobre – producción ni tampoco sub – producción de caudales. Al analizar para calibración tanto Bias como los demás índices se puede decir que el Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ) es la mejor estructura, a pesar que sus valores son parecidos a los de la otra estructura. Si analizamos para validación observamos que el Modelo Estándar (Versión Básica) con sus valores de eficiencia representa como mejor estructura. Si analizamos todo, tanto índices de eficiencia como calibración y validación de forma conjunta podemos decir que la mejor estructura es el Modelo Estándar (Versión Básica), ya que cada uno de sus índices de eficiencia tiene buenos valores para ser adaptados a la cuenca.

Tabla 8: Valores de los índices de eficiencia optimizado por Sesgo Relativo Bias.

CALIBRACIÓN					VALIDACIÓN			
OPTIMIZADO POR SESGO RELATIVO BIAS								
Estructuras	Índices Estadísticos				Índices Estadísticos			
	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Modelo Estándar (Versión Básica)	0.82	0.65	0.89	0.11	0.59	0.59	0.65	26
Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ)	0.81	0.55	0.82	0.02	0.66	0.53	0.68	69

De acuerdo a la Optimización de Sesgo Relativo Bias se realiza un estudio para calibración. Las Figuras 8a) del Modelo Estándar (Versión Básica) y 9a) del Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ), representan la simulación de caudales, siendo la Figura 8a) la que mejor simulación representa para caudales altos y bajos. Para dispersión se puede observar que las Figuras 8b) y 9b) no tienen una buena correlación entre caudales observados y simulados, sus puntos no se encuentran en la bisectriz. El balance hídrico es muy representado por la Figura 8c), al existir un buen comportamiento del valores modelados, ya que no presenta al final del balance una mínima sub – estimación de caudales, caso contrario se observa en la Figura 9c) que existe sub - estimación más extensa de caudales. Éste análisis concluye como mejor estructura el Modelo Estándar (Versión Básica). Analizando validación se compara primero las Figuras 8d) y 9d) para conocer la mejor simulación de caudales altos y bajos, dando como mejor simulación la Figura 8d). Para dispersión en las Figuras 8e) y 9e) no existe buena correlación entre caudales observados y modelados; sin embargo la Figura 8e) tiene un poco más de proximidad de puntos a la bisectriz. El balance hídrico por medio de las Figuras 8f) y 9f) definen que el mejor balance se obtiene en la Figura 9f) donde se muestra un balance muy bueno, siendo el sesgo es muy similar hasta antes de Junio de 2013, donde se presentó el error. La mejor estructura que se identifica con la validación es el Modelo Estándar (Versión Básica), pese a que el balance fue mejor en la otra estructura, pero existe una mínima diferencia. En este análisis se puede apreciar claramente que cuando optimizamos el modelo para reducir el sesgo, se obtiene un resultado que reduce la calidad de los ajustes a los picos y caudales bajos, pero que mejora notablemente el balance (Figuras 8.c) y 8.f).

Figura 8: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión Básica) optimizado por Sesgo Relativo Bias.

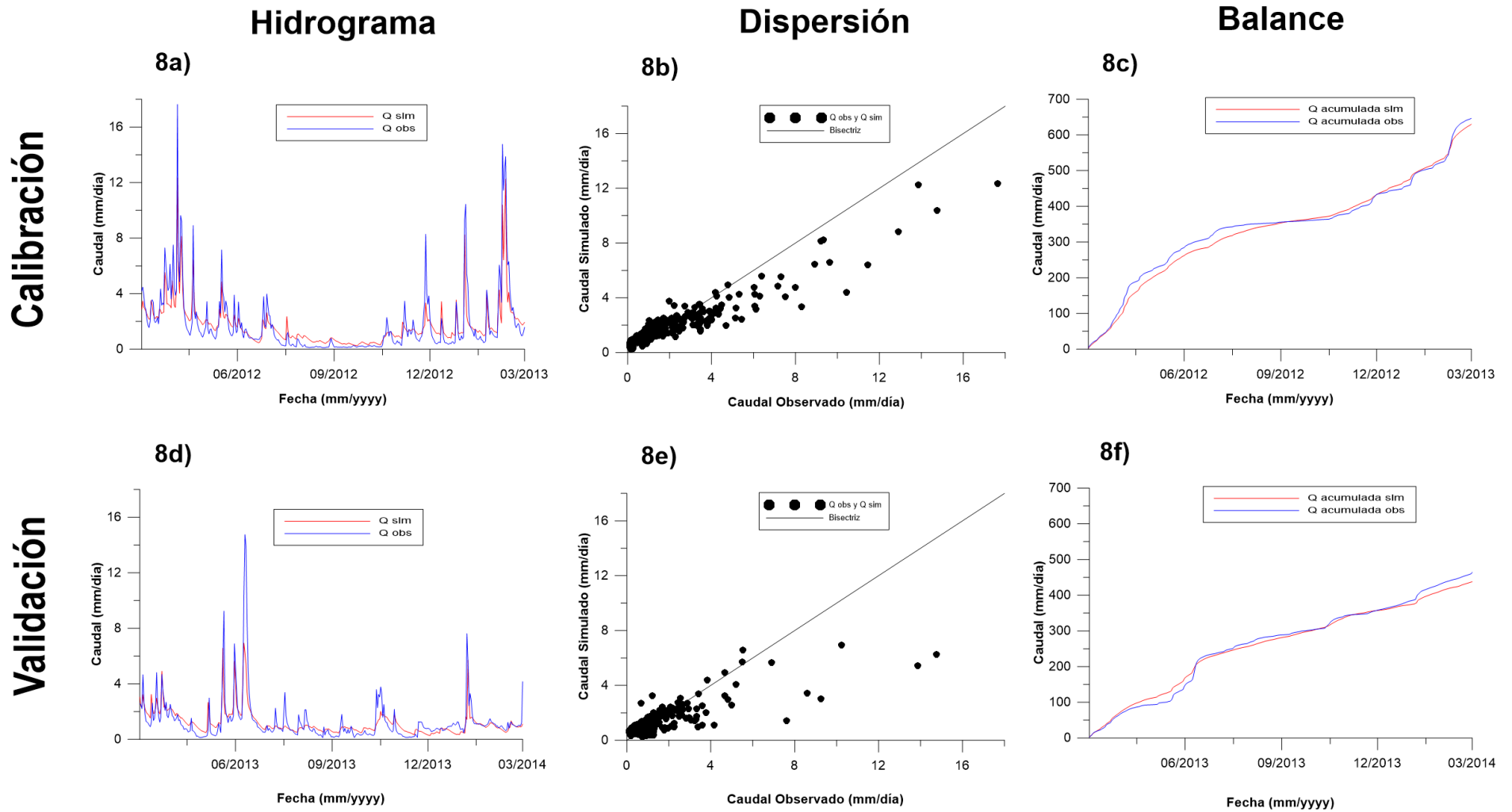
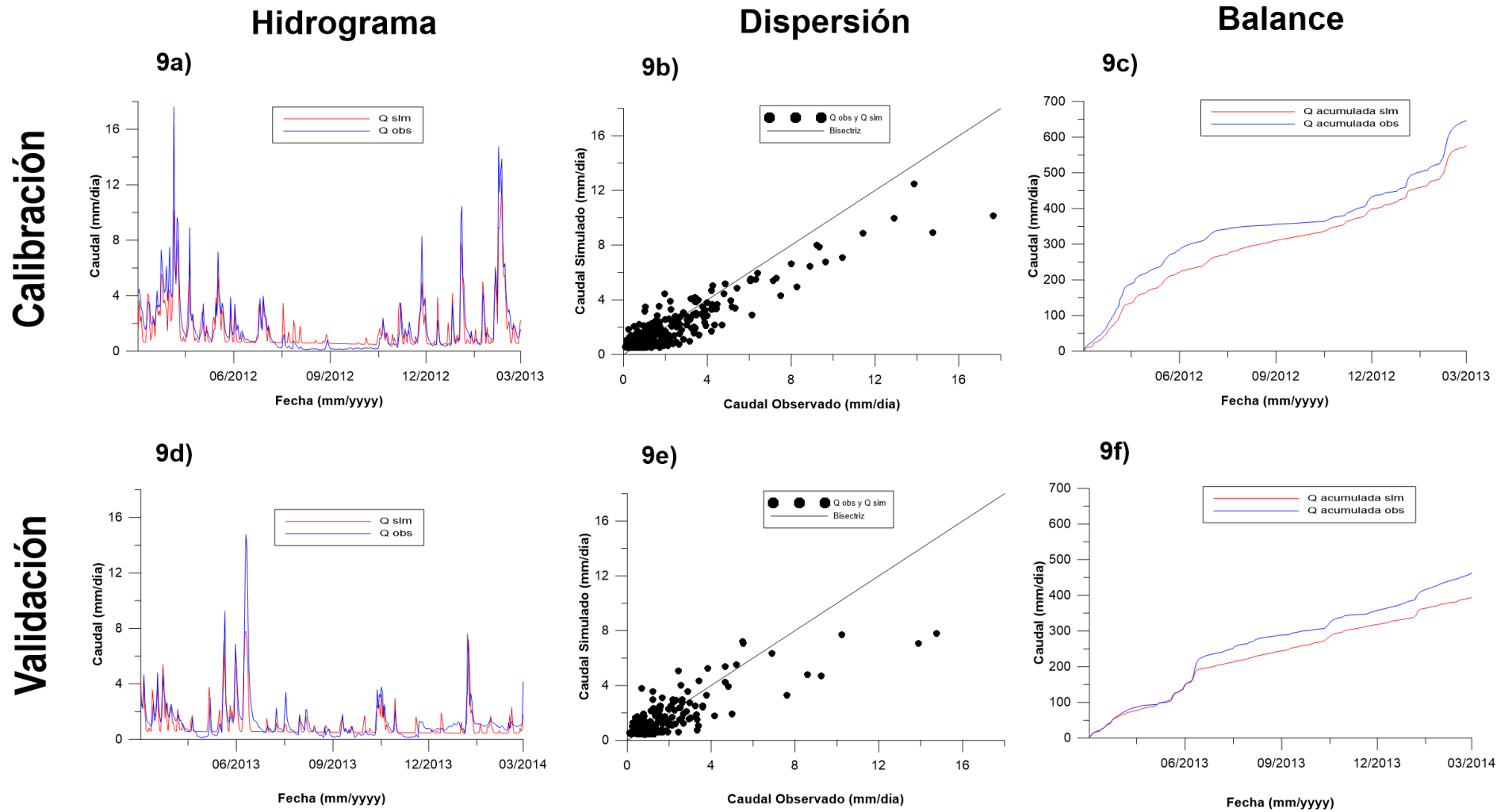


Figura 9: Calibración y Validación del Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ) optimizado por Sesgo Relativo Bias.



3.3.2 Conclusiones para el Modelo HBV – light agregado.

Se ha realizado el análisis de acuerdo a cada Optimización (Nash – Sutcliffe, Nash – In y Sesgo Relativo Bias), en cada caso se presentó la mejor estructura. En el caso de Optimización Nash – Sutcliffe la mejor estructura es el Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica). Para Optimización Nash – In la mejor estructura es el Modelo de 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ). Y para Optimización de Sesgo Relativo Bias la mejor estructura es el Modelo Estándar (Versión Básica). Al ser la mejor estructura diferente para cada optimización quiere decir que depende del análisis que necesito realizar o de los objetivos del estudio, para identificar la mejor estructura. Siendo mi interés en los diferentes índices de eficiencia existe una mejor estructura que se adapta a ello.

Criterios de optimización como Nash – Sutcliffe y Nash – In son los adecuados para simular los picos altos y bajos respectivamente.

Si se está interesado en los caudales promedios y en simular el balance hidrológico (y con menos interés en los picos), se debería utilizar Sesgo Relativo Bias como criterio de optimización en la autocalibración.

3.3.3 Resultados la Calibración y Validación para el Modelo HBV – light semidistribuido.

Para esta parte de la investigación que consta de la aplicación del Modelo HBV – light semidistribuido se tomó en cuenta la Subcuenca de salida (S8) que nos dará una representación completa del Observatorio Ecohidrológico Zhuruway; a continuación se analiza los resultados de la misma.

3.3.3.1 Optimizado por Nash - Sutcliffe

La Optimización de Nash – Sutcliffe nos permitió realizar una calibración y validación de las estructuras del modelo hidrológico HBV – light, dando como resultado 3 mejores estructuras, de las cuales se evaluarán las dos estructuras con un mejor índice de eficiencia (Tabla 9), la otra estructura se describe en el Anexo 5, con índices altos pero no tan representativos como los que se mostrarán a continuación. La optimización de Nash – Sutcliffe nos indica que el Modelo Estándar (Versión Básica) es la mejor estructura para dicho índice, teniendo un valor de 0.86. Para definir la mejor estructura para calibración y validación se analizan los valores tanto de Nash – Sutcliffe como los de los otros índices. Siendo en este caso para calibración y validación la misma estructura; el Modelo Estándar (Versión Básica). Al ser numéricamente una mínima diferencia se puede decir que las dos estructuras pueden ser aplicadas para esta optimización.

Tabla 9: Valores de los índices de eficiencia optimizado por Nash - Sutcliffe.

CALIBRACIÓN					VALIDACIÓN			
OPTIMIZADO POR NASH - SUTCLIFFE								
Estructuras	Índices Estadísticos				Índices Estadísticos			
	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Modelo Estándar (Versión Básica)	0.86	0.78	0.87	44.62	0.60	0.56	0.67	53.25
Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ)	0.85	0.78	0.87	40.69	0.59	0.17	0.67	56.88

Para conocer una mejor estructura de calibración mediante la optimización de Nash – Sutcliffe se realizará lo siguiente: una comparación entre las Figuras 10a) del Modelo Estándar (Versión Básica) y 11a) del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ), para conocer la estructura que presente una mejor simulación. La Figura 10a) en su hidrograma simboliza una simulación muy buena de caudales pico y caudales bajos. La Figura 10b) y 11b) que corresponden a correlación. Dicha correlación no es muy buena entre caudales observados y simulados, puesto que sus puntos no están dentro de la bisectriz. En cuanto a balance hídrico se presenta una subestimación de caudales en las Figuras 10c) y 11c); sin embargo la diferencia que existe entre las dos Figuras son mínimas, pero como mejor representación es la Figura 10c), por su sesgo de simulación que es más próximo a los valores de observación. De acuerdo a éste análisis se puede decir que la mejor estructura es el Modelo Estándar (Versión Básica). Para la mejor estructura de validación se realiza primero una comparación entre la Figura 10d) y 11d), donde la Figura 10d) simula de mejor manera caudales altos y bajos. La dispersión presente en las Figuras 10e) y 11e) muestran que no existe correlación entre caudales modelados y observados. El balance hídrico se compara en las Figuras 10f) y 11f), ambas Figuras muestran que no existe ni sub ni sobre - producción de caudales, existiendo un sesgo igual para valores observados y simulados. Por todo el análisis realizado se puede decir que la mejor estructura es el Modelo Estándar (Versión Básica).

Figura 10: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión Básica) optimizado por Nash – Sutcliffe.

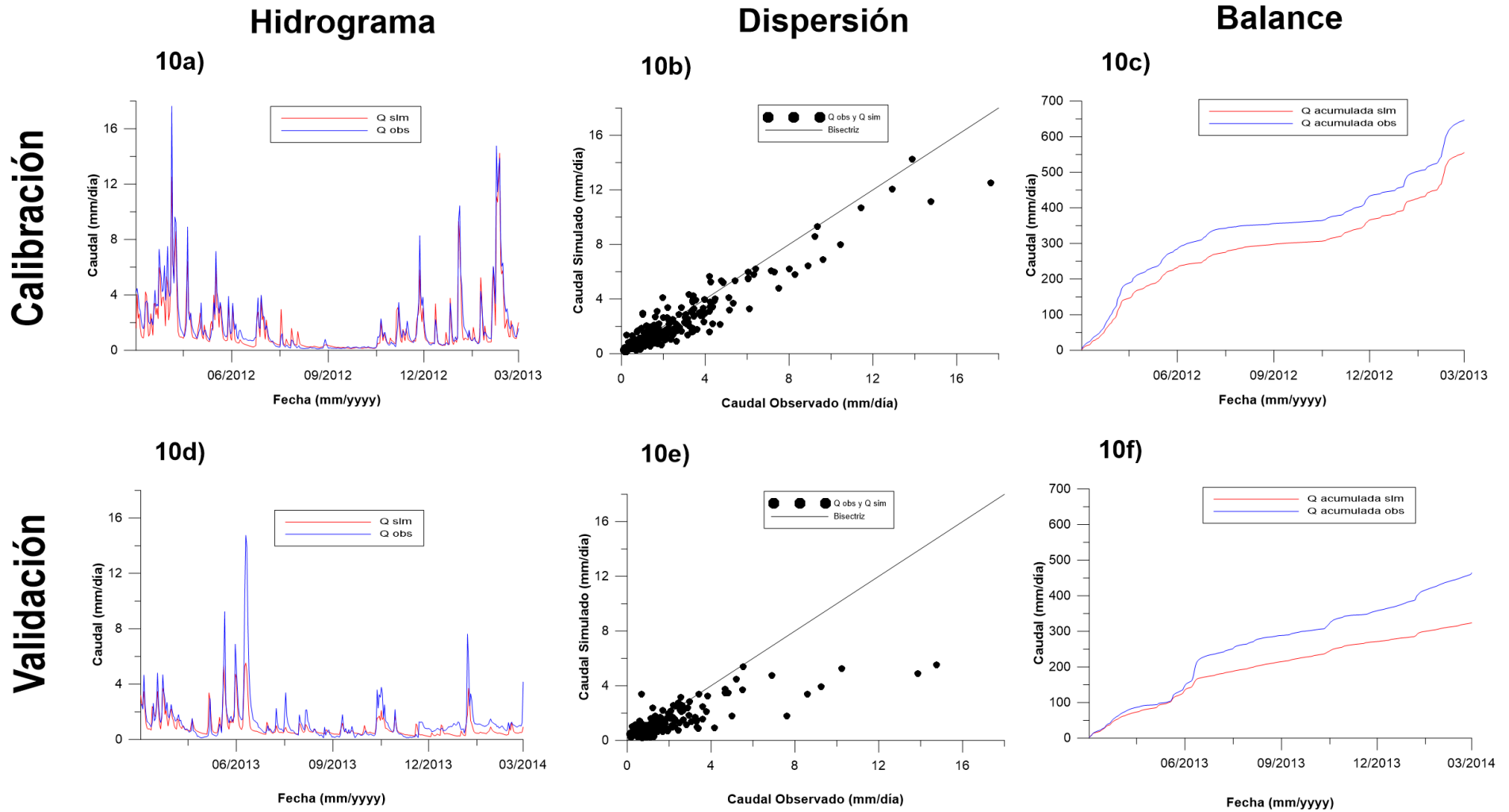
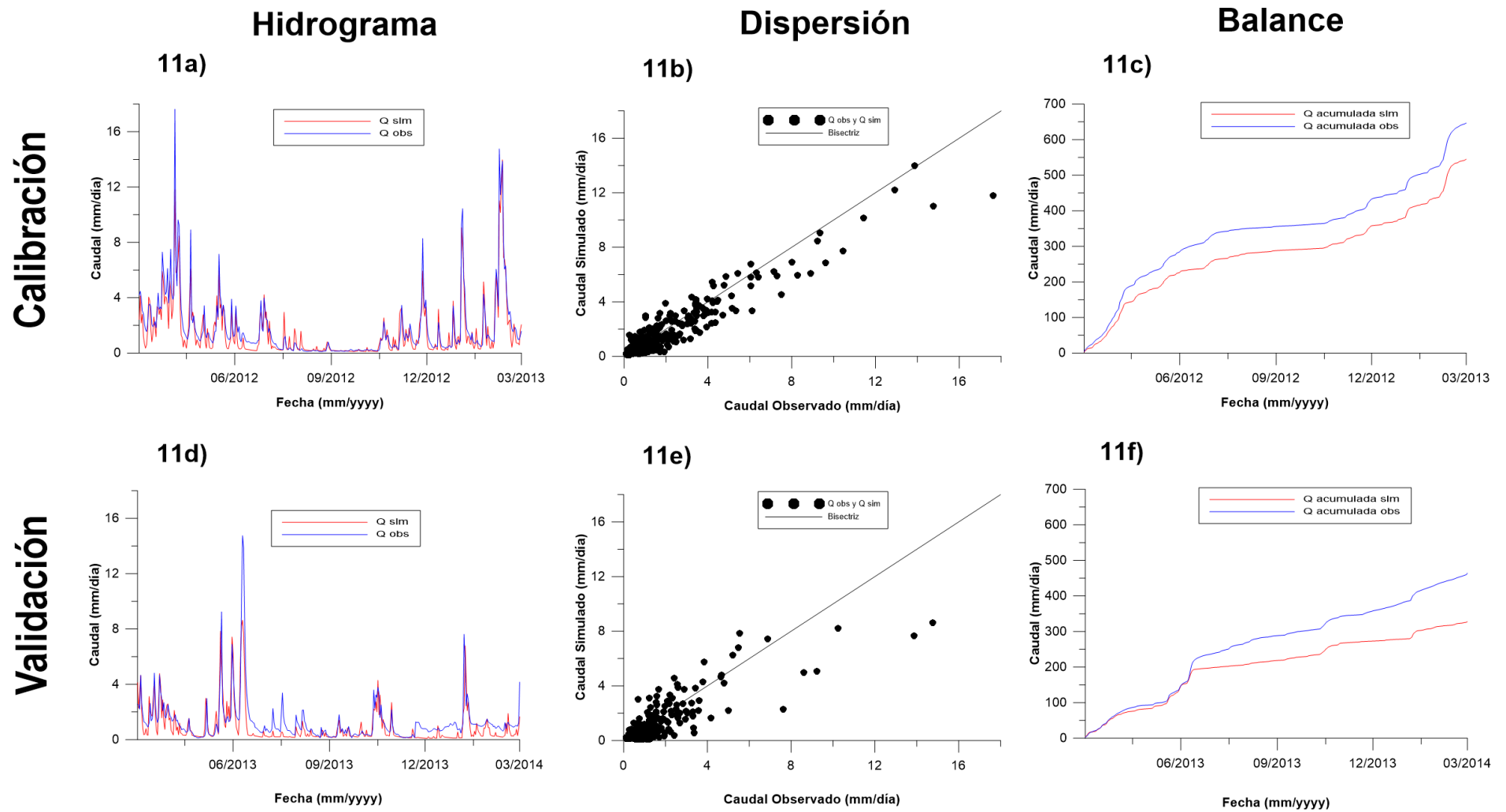


Figura 11: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) optimizado por Nash – Sutcliffe.



3.3.3.2 Optimizado por Nash – In.

Nash – In presenta 4 estructuras, dos de ellas las de mayor eficiencia se evaluarán en la Tabla 10, mientras que las otras dos un poco menores de eficiencia se muestran en el Anexo 6; cada estructura se basa en calibración y validación para el análisis de resultados. Para optimización de Nash – In existe un valor de 0.86 para decir que la mejor estructura es Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ). Para calibración, los valores de todos los índices se analizan, teniendo como mejor estructura el Modelo estándar (Versión Básica) aunque numéricamente existe una mínima diferencia. En el caso de validación y realizando el mismo análisis se puede apreciar que la mejor fue el Modelo Estándar (Versión Básica).

Tabla 10: Valores de los índices de eficiencia optimizado por In - Nash.

CALIBRACIÓN					VALIDACIÓN			
OPTIMIZADO POR IN - NASH								
Estructuras	Índices Estadísticos				Índices Estadísticos			
	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias	Nash- Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Modelo Estándar (Versión Básica)	0.79	0.85	0.84	83.13	0.57	0.44	0.72	71.63
Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ)	0.76	0.86	0.81	85.76	0.56	0.38	0.71	95.75

De acuerdo a la Optimización de Nash – In se realiza el análisis para calibración. Comparando las Figuras 12a) del Modelo Estándar (Versión Básica) y 13a) del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ), se puede decir que la Figura 12a) simula de mejor manera los picos altos y bajos. Las figuras 12b) y 13b) representan la correlación existe que entre caudales observados y simulados, observando una igualdad de correlación en las dos Figuras. El balance hídrico se compara en las Figuras 12c) y 13c), las dos Figuras presentan sub - estimación de caudales. Para definir la mejor estructura para calibración se realizó el respectivo análisis, aunque los valores son muy parecidos en las dos estructuras se define como mejor estructura al Modelo Estándar (Versión Básica), por la representación muy buena que tiene para picos altos y bajos. En cuanto a validación existe una mejor simulación de caudales en la Figura 12d) con respecto a la Figura 13d), por la simulación de caudales altos y bajos que presenta dicha figura en el hidrograma. La correlación de caudales observados y simulados para validación no es muy buena, es lo que indican las Figuras 12e) y 13e). Para el balance hidrológico se comparan las Figuras 12f) y 13f), en las dos Figuras se presenta poca sub – producción de caudales. Por el análisis que se hizo se puede decir que el Modelo Estándar (Versión Básica) fue la estructura que mejor representatividad tuvo, existiendo una mínima diferencia con la otra estructura, como se presentó en las observaciones.

Figura 12: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión Básica) optimizado por Nash – In.

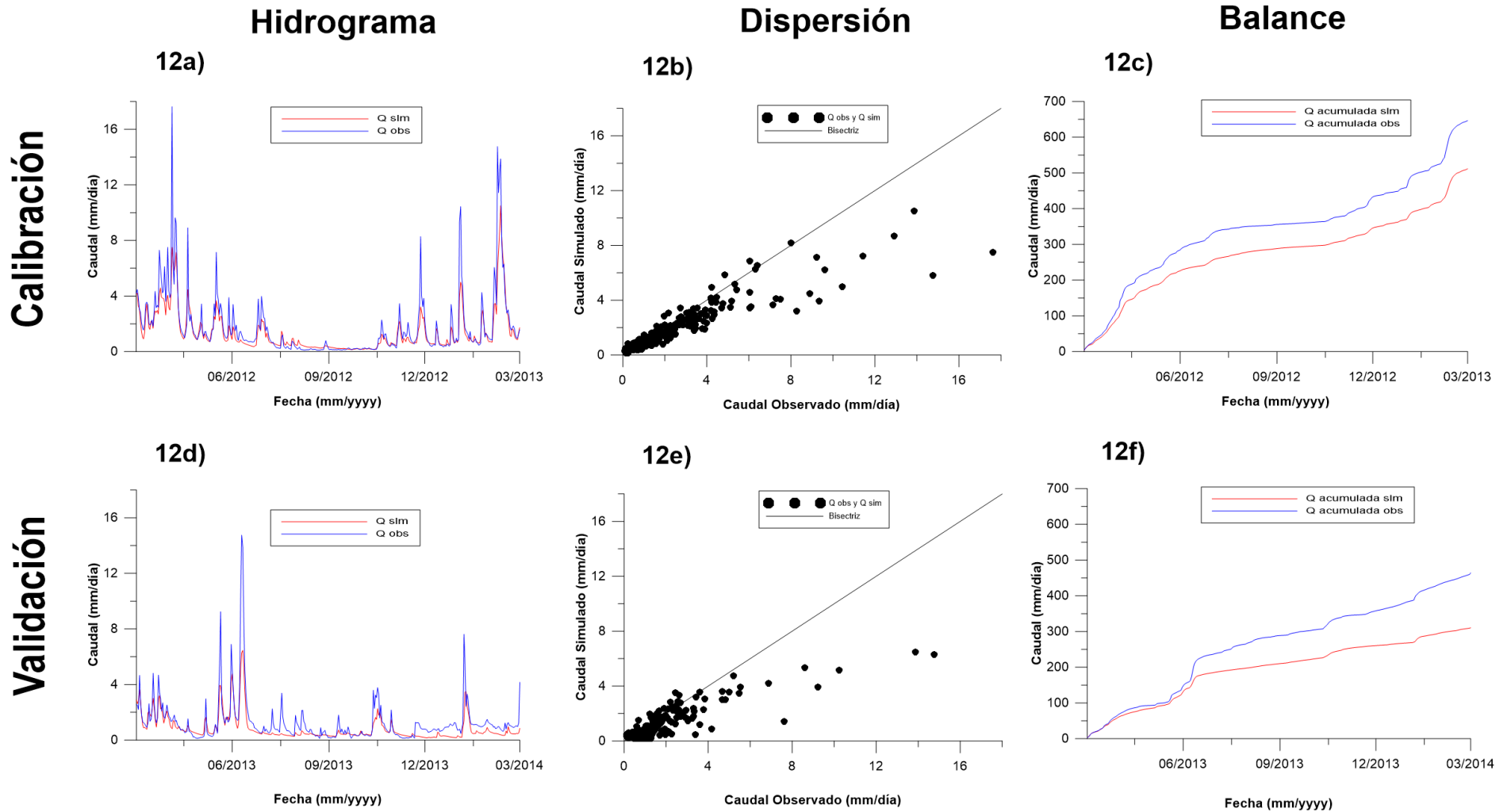
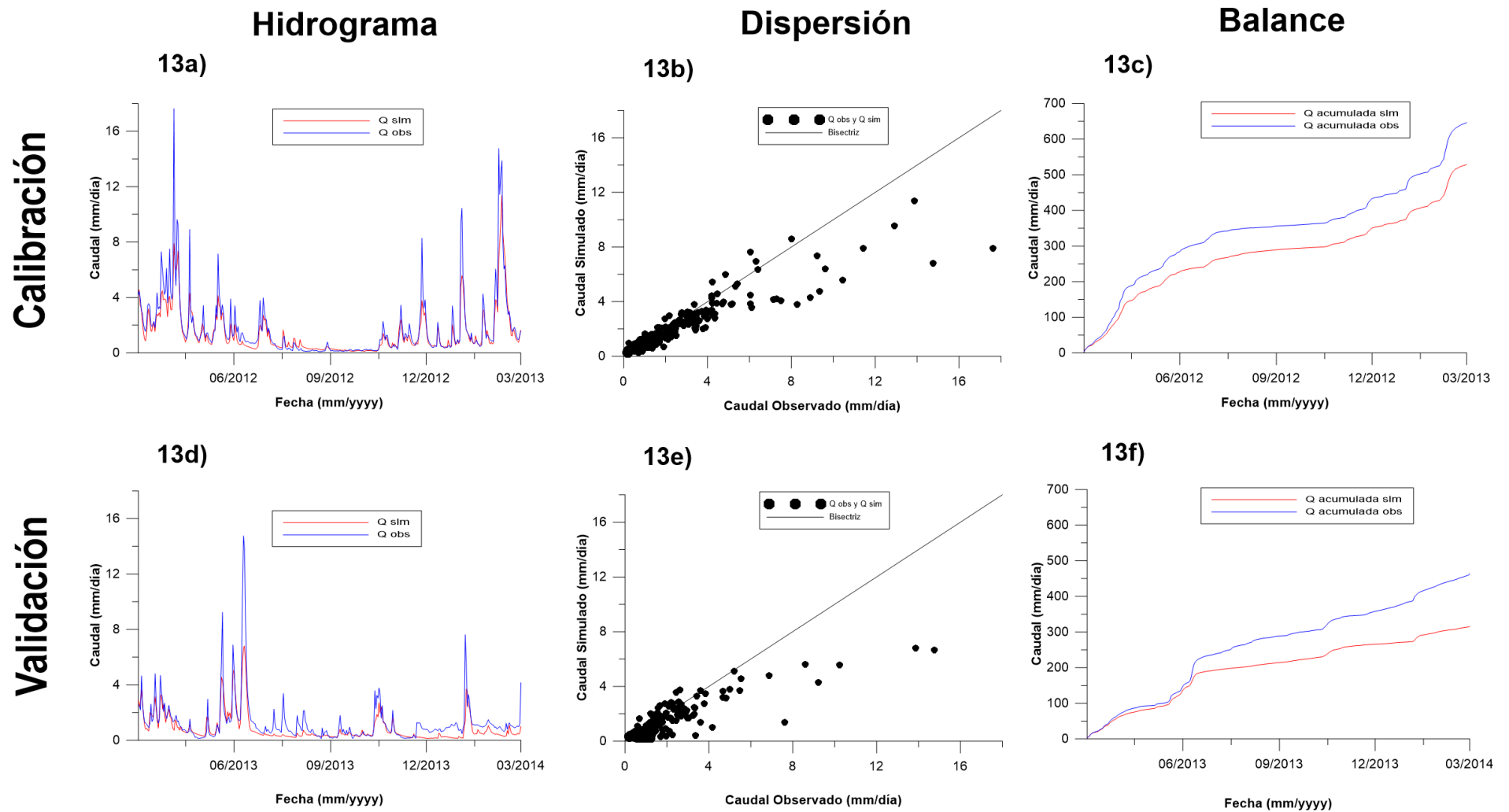


Figura 13: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) optimizado por Nash – In.



3.3.3.3 Optimizado por Sesgo Relativo Bias.

La Tabla 11 mediante la Optimización de Sesgo Relativo Bias nos indica las 2 mejores estructuras dentro del desarrollo de la calibración y validación del modelo HBV – light semistribuido. Para la optimización Sesgo Relativo Bias la mejor estructura fue el Modelo Distribuido (Versión UZL, K0 en la capa SUZ), por el valor que representa el índice. Al analizar para calibración tanto Bias como los demás índices indican que el Modelo Distribuido (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) es la mejor estructura. Si analizamos para validación observamos que el Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) con sus respectivos valores de eficiencia se representa como mejor estructura.

Tabla 11: Valores de los índices de eficiencia optimizado por Sesgo Relativo Bias.

CALIBRACIÓN					VALIDACIÓN			
OPTIMIZADO POR SESGO RELATIVO BIAS								
Estructuras	Índices Estadísticos				Índices Estadísticos			
	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ)	0.73	0.53	0.76	0.21	0.51	0.49	0.65	12.63
Modelo Distribuido (Versión UZL, K0 en la capa SUZ)	0.77	0.66	0.81	0.08	0.53	0.37	0.55	-9.38

De acuerdo a la Optimización de Sesgo Relativo Bias se realiza un estudio para calibración. Las Figuras 14a) del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) y 15a) del Modelo Distribuido (Versión UZL, K0 en la capa SUZ), representan la simulación de caudales, siendo la Figura 14a) la que mejor simulación tiene entre caudales observados y simulados. Para dispersión se puede observar las Figuras 14b) y 15b). La Figura 14b) representa de mejor manera la correlación entre caudales observados y simulados, estando los puntos de correlación cercanos a la bisectriz. El balance hídrico es muy representado por la Figura 14c), al tener un sesgo parecido a los valores de caudales observados. Caso contrario se observa en la Figura 15c) que existe valores de sesgo superiores a partir de 08/2012, mostrando un cambio en la simulación a partir de esta fecha. Éste análisis concluye como mejor estructura el Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ). Analizando validación se compara primero las Figuras 14d) y 15d) para conocer la mejor simulación de caudales, dando como mejor simulación la Figura 14d). Para dispersión en las Figuras 14e) y 15e) no existe buena correlación entre caudales observados y modelados; sin embargo la Figura 14e) tiene un poco más de proximidad de puntos a la bisectriz. El balance hídrico por medio de las Figuras 14f) y 15f) definen el mejor balance, en este caso las dos Figuras presentan sesgos superiores a los valores observados. Después de observar completamente cada figura se puede decir que la mejor estructura que se identifica con la validación es el Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ).

Figura 14: Calibración y Validación del Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) optimizado por Sesgo Relativo Bias.

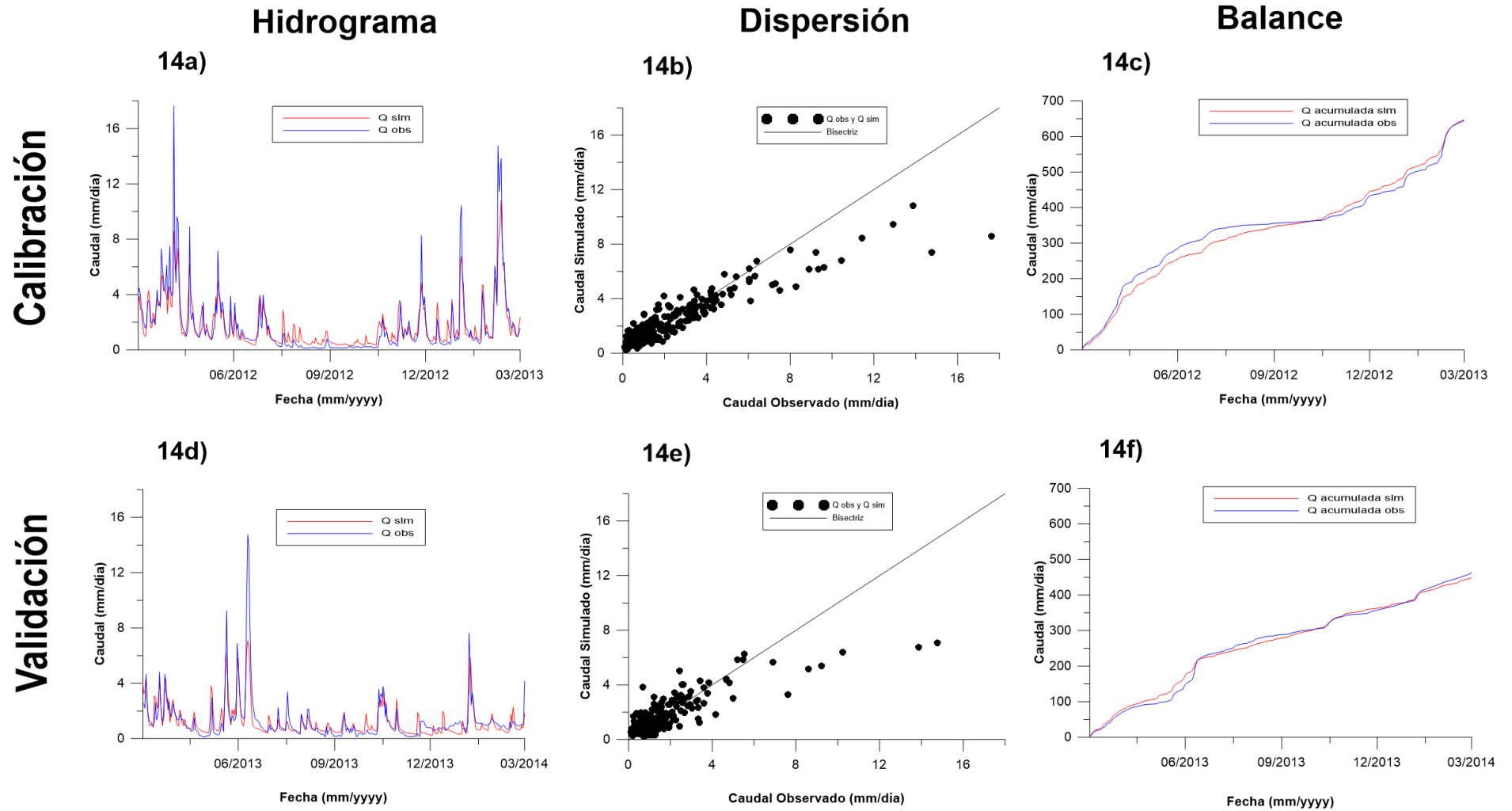
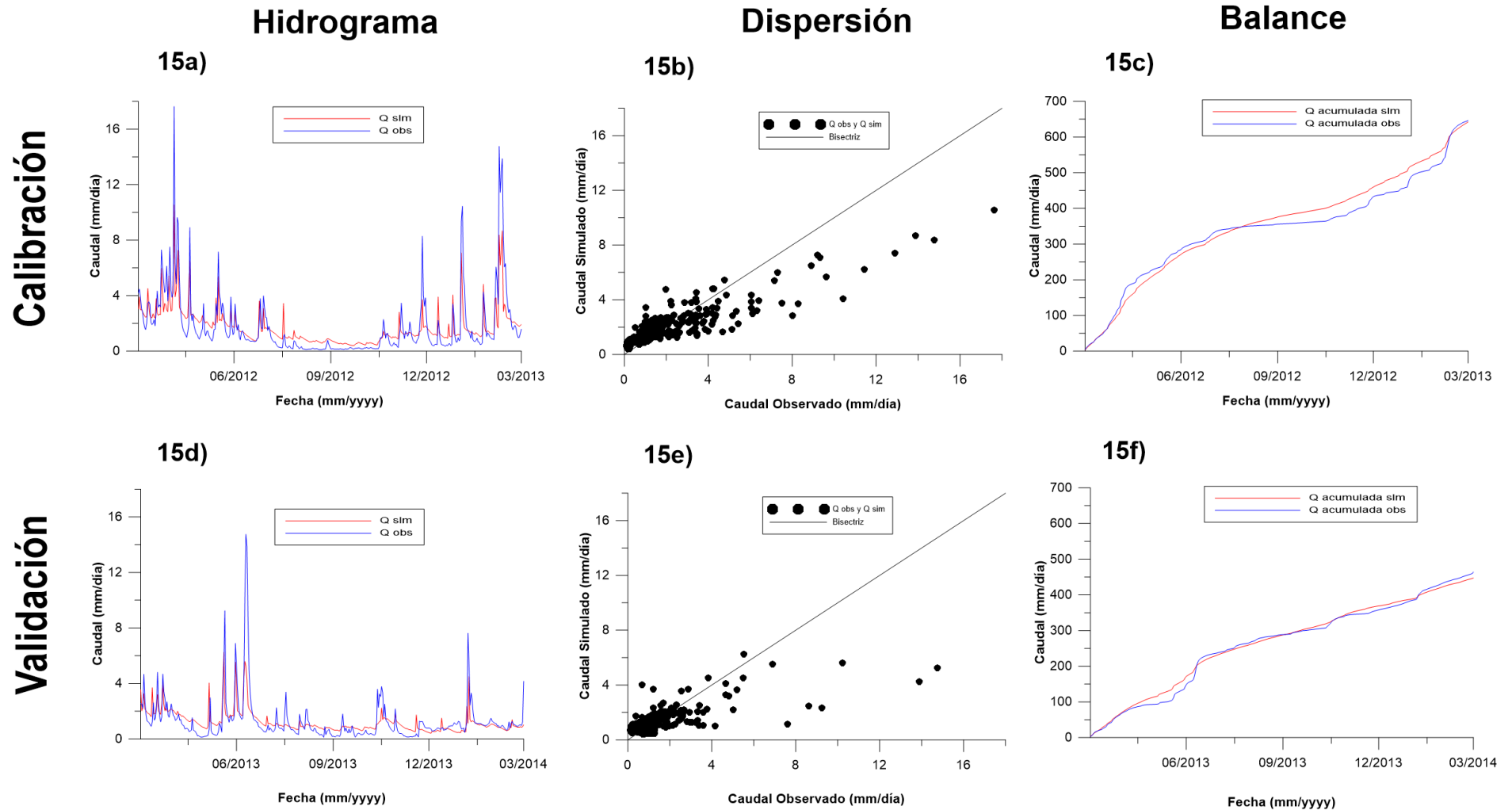


Figura 15: Calibración y Validación del Modelo Distribuido (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) optimizado por Sesgo Relativo Bias.



3.3.4 Conclusiones para el Modelo HBV – light semidistribuido.

Una vez finalizado el análisis de acuerdo a cada Optimización (Nash – Sutcliffe, Nash – In y Sesgo Relativo Bias) en cada caso se presentó la mejor estructura. Cuando se optimiza para Nash – Sutcliffe y Nash – In la mejor estructura es el Modelo Estándar (Versión Básica). Cuando se optimiza para el Sesgo Relativo Bias la mejor estructura es el Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ). Al tener gran concordancia entre las estructuras para las diferentes optimizaciones se puede decir que el Modelo Estándar es el más firme para representar de mejor manera la cuenca en estudio.

4. CONCLUSIONES FINALES

La modelación hidrológica conforme de aplica en varios sectores se obtienen varias ventajas, entre ellas detectar deslices con los datos, como los que se presentó en el caudal 8 que sufrió anomalías en los datos con respecto a los otros caudales. De esa manera se puede corregir y obtener mejores resultados de calibración, validación y simulación.

Los resultados del modelo hidrológico HBV - light agregado y semistribuido son muy similares en lo que respecta a optimización de Nash – Sutcliffe, Nash – In- y Sesgo Relativo Bias tanto para calibración y validación. Sin embargo las estructuras que se adaptan a la cuenca tienen grandes variaciones.

Las estructuras resultantes para el modelo HBV – light Semidistribuido son: para el caso de Optimización de Nash – Sutcliffe fue el Modelo Estándar (Versión Básica), para la optimización de Nash – In fue el Modelo Estándar (Versión Básica) y para la optimización de Sesgo Relativo Bias) el Modelo Estándar (Versión UZL, K0 en la capa SUZ). El modelo estándar al estar presente en las optimizaciones se concluye que es la estructura más adaptable a la cuenca del Observatorio Ecohidrológico Zhurucay. La estructura está compuesta por dos capas dentro del suelo, el Modelo Estándar tiene una entrada de flujo hídrico y dos salida de agua, subsuperficial y subterránea.

La aplicación del modelo HBV – light semidistribuida es mucho más completa y requiere de mucho esfuerzo para implementarla. Hay que conocer las condiciones de la cuenca que se estudia, su cobertura vegetal, sus tipos de suelo, la lluvia espacial, y todo esto dividido por sus subcuencas. Esta información es fundamental para los estudios futuros, y de ello depende la certeza de aplicar correctamente el modelo semidistribuido a la cuenca. Siendo así se podrá incluir varios proyectos a partir de éste tema.



Al inicio de la investigación fue un reto y una meta propuesta aplicar el modelo hidrológico HBV – light en un ecosistema páramo, siendo éste completamente nuevo para esta zona. Los resultados presentes en este estudio han demostrado que son positivos, favorables y adaptables para la respectiva aplicación y futura implementación del modelo en zonas de páramo, ya que sus estructuras permiten entender el funcionamiento y comportamiento de la cuenca de páramo y en nuestro caso dentro del Observatorio Ecohidrológico Zhuruca.

5. RECOMENDACIONES

La modelación hidrológica es un camino muy extenso que se debe recorrer. He empezado a realizarlo y es por ello que algunas sugerencias compartiré para proceder a realizar la modelación en cuencas similares:

1. Los objetivos propuestos para una buena modelación deben estar claros y concisos para evitar cualquier distracción en el proceso de construcción (calibración y validación) del modelo.
2. Estudiar y entender correctamente el funcionamiento del modelo hidrológico que se va a emplear, conociendo sus parámetros y estructuras.
3. Para la modelación en sí, se debe realizar una recolección precisa y necesaria de datos, efectuando un control de calidad muy estricto de los mismos. Si no se dispone de datos de muy buena calidad, será imposible calibrar el modelo y los resultados no podrán ser utilizados para futuros trabajos.
4. La clave de una calibración exitosa es empezar por la estructura más simple que ofrece el modelo; luego evaluar una estructura con dos capas y así sucesivamente hasta llegar a la más compleja.
5. Con las estructuras calibradas y entendidas se procede seguidamente a una validación que será más familiar por el conocimiento obtenido de la calibración.
6. Finalmente es importante conocer cada uno de los índices de eficiencia necesarios para poder evaluar el proceso de implementación del modelo hidrológico.

6. TRABAJO FUTURO

Esta tesis es tan solo el inicio de varias investigaciones, programas y proyectos que se desarrollarán más adelante, algunas de ellas se describen a continuación:

1. Se debe realizar la corrección adecuada de los datos de caudal del sensor ubicado en el vertedero 8 para las investigaciones que se desarrollen en el futuro.
2. Analizar la sensibilidad de los datos que se ingresan al modelo, analizando otros métodos de cálculo para lluvia espacial y otras maneras de calcular evapotranspiración de referencia.
3. Analizar la sensibilidad de los parámetros del modelo HBV – light. Conocer cada uno de mejor manera y evaluarlos para conocer con más certeza la estructura más adaptable a la cuenca.
4. Analizar el Modelo Hidrológico HBV - light a la salida de cada subcuenca para conocer si los parámetros del modelo pueden ser relacionados con las características físicas particulares de cada una.
5. Probar el Modelo Hidrológico HBV - light con más años de calibración y validación.
6. Analizar la factibilidad de realizar estudios de cambio de uso de suelo aplicando HBV – light.
7. Mi tesis constó en identificar las mejores estructuras que se adaptan de mejor manera a la cuenca, sin embargo sugiero que se analice la evaluación de los sub - flujos (flujo base, interflujo y flujo rápido) como otro criterio para identificar las estructuras.

REFERENCIAS

- Albuja, C., & Tenelanda, D. (2014). Desarrollo de un modelo conceptual de Lluvia - Escorrentía para interpretación de Procesos Hidrológicos en la Cuenca Altoandina del Río Zhurucay.
- Almeida, A. (2009). "Auditoría de Gestión a los Procesos de la Compañía COCA CODO SINCLAIR S.A."
- Aucapiña, G., & Marín, F. (2014). Efectos de la posición Fisiográfica en las propiedades Hidrofísicas de los suelos de páramo de la microcuenca del Río Zhurucay.
- Beven, K. J. (2012). Rainfall-Runoff Modelling. Wiley.
- Buytaert, W., Céleri, R., Bièvre, B. De, & Cisneros, F. (2004). Hidrología del Páramo Andino: propiedades, importancia y vulnerabilidad.
- Buytaert, W., Céleri, R., De Bièvre, B., Deckers, J., & Wyseure, G. (2005). Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo en el Sur del Ecuador con TOP MODEL. Mecanismo de Información de Páramos, 1–10. Retrieved from <http://paramo.cc.ic.ac.uk/pubs/ES/topmodel.pdf>
- Buytaert, W., Iñiguez, V., Celleri, R., De Bièvre, B., Wyseure, G., & Deckers, J. (2006). Analysis of the Water Balance of Small Páramo Catchments in South Ecuador (pp. 271–281). https://doi.org/10.1007/1-4020-4228-0_24
- Cabrera, J. (2011). Evaluación de los recursos hídricos en una cuenca de alta montaña (cuenca del río Bérchules, Sierra Nevada, Granada) utilizando modelos hidrológicos agregados y semidistribuidos., 3–5.
- Carrasco, A. (n.d.). Los Servicios Ambientales y el Páramo. Retrieved from <http://www.condesan.org/e-foros/paramos2/PonenciaACTema3.htm>
- CELEC EP. (2016). Enerjubones. Retrieved from https://www.celec.gob.ec/enerjubones/index.php?option=com_content&view=article&id=18&Itemid=103

- Célleri, R., & Feyen, J. (2009). The Hydrology of Tropical Andean Ecosystems : Importance , Knowledge Status , and Perspectives, 29(4), 350–355.
- Chuquín, D. (2016). Aplicación de un modelo Semidistribuido de Precipitación-Escorrentía para la evaluación de los recursos hídricos en la cuenca del Río Jalón. Universidad Politécnica de Valencia.
- Cordova, M., Carrillo-Rojas, G., Crespo, P., Wilcox, B., & Celleri, R. (2015). Evaluation of the Penman-Monteith (FAO 56 PM) Method for Calculating Reference Evapotranspiration Using Limited Data Application to the Wet Paramo of Southern Ecuador. Mountain Research and Development, 35(May), 230–239. <https://doi.org/10.1659/mrd-journal-d-14-0024.1>
- Córdova, M., Carrillo, G., & Célleri, R. (2013). Errores en la Estimación de la Evapotranspiración de Referencia de una Zona de Páramo Andino Debidos al Uso de Datos Mensuales, Diarios y Horarios, 5(2), 14–22.
- Córdova Mora Mario. (2013). Análisis del comportamiento de la Evapotranspiración de Referencia (ET_o) en un Ecosistema Páramo mediante la ecuación combinada de Penman - Monteith.
- Cortés, G. (2010). Evaluación de un Modelo Hidrológico Semidistribuido para la estimación de la escorrentía de deshielo en el Río Juncal.
- Díaz-Granados, M., Navarrete, J., & Suárez, T. (2005). Páramos: Hidrosistemas Sensibles.
- El Telégrafo. (2014). El agua en Ambato cubre las necesidades, pero también recrea. Retrieved from <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/regional-centro/1/el-agua-en-ambato-cubre-las-necesidades-pero-tambien-recrea>
- EPMAPS, A. de Q. (2016). Agua Quito. Retrieved from <http://www.aguaquito.gob.ec/papallacta-informacion-general>
- ETAPA-EP. (n.d.). ETAPA EP - Servicios de Telefonía, Televisión, Internet, Agua Potable, Alcantarillado de Cuenca - Ecuador > Productos y servicios > Agua potable > Agua Potable. Retrieved from <http://www.etapa.net.ec/Agua-potable/Potabilizacion/Informacion-General>
- Ewen, J., & Parkin, G. (1996). Validation of catchment models for predicting land-

- use and climate change impacts. 1. Method. *Journal of Hydrology*, 175, 583–594. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80026-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80026-6)
- Finger, D., Vis, M., Huss, M., & Seibert, J. (2015). The value of multiple data set calibration versus model complexity for improving the performance of hydrological models in mountain catchments, 4840–4847. <https://doi.org/10.1002/2015WR017273>. Received
- Gualpa, M. (2013). Efecto de la incertidumbre de las observaciones hidrometeorológicas en estudios hidrológicos (Zhurucay, Soldados y Mazar).
- Gualpa, M., & Céleri, R. (2013). Efecto de la estimación de la presión atmosférica sobre el cálculo de niveles agua y caudales. *Aqua-LAC*, 5 (2), 56–68. Retrieved from http://www.unesco.org.uy/phi/aqualac/fileadmin/phi/aqualac/Numero_5_vol_2/AqualacVol5N2-_Efecto_de_la_estimacion.pdf
- INEC. (2010). Ecuador en Cifras.
- Jaramillo, A. (2011). Análisis y Evaluación preliminar del régimen de escurrimiento superficial y su uso actual en la Microcuenca del Río Zhurucay. Cantones Girón, San Fernando - Provincia del Azuay.
- Krause, P., & Boyle, D. P. (2005). Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances In Geosciences*, 5(89), 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Llambí, L. D., Soto-w, A., Céleri, R., Bievre, B. De, Ochoa, B., & Borja, P. (2012). Ecología, hidrología y suelos de páramos. Proyecto Páramo Andino.
- Medina, D., & Galindo, C. G. (2009). Ajuste de un Modelo Lluvia-Caudal para la Cuenca Media del Río Paute Aplicando el Modelo Neuro-Difuso ANFIS, 22, 27–36.
- Mena, P., & Hofstede, R. (2006). Los páramos ecuatorianos.
- Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. (2016). Proyecto Hidroeléctrico Sopladora. Retrieved from <http://www.energia.gob.ec/sopladora/>

- Mosquera, G., Córdova, M., & Céleri, R. (2016). Field Guide and Research Results Ecohydrological Observatories in High – Elevation Tropical Ecosystems.
- Mosquera, G., Lazo, P., Cárdenas, I., & Crespo, P. (2013). Identificación de las principales fuentes de agua que aportan a la generación de escorrentía en zonas Andinas de páramo húmedo: mediante el uso de los isótopos estables deuterio ($\delta^2\text{H}$) y oxígeno- 18 ($\delta^{18}\text{O}$). *Maskana*, 3(2), 87–105.
- Mosquera, G. M., Céleri, R., Lazo, P. X., Vaché, K. B., Perakis, S. S., & Crespo, P. (2016). Combined use of isotopic and hydrometric data to conceptualize ecohydrological processes in a high-elevation tropical ecosystem. *Hydrological Processes*, 30(17), 2930–2947. <https://doi.org/10.1002/hyp.10927>
- Orduña, L. M. (2007). Pronóstico probabilístico de caudales de avenida mediante redes bayesianas aplicadas sobre un modelo hidrológico distribuido. Thesis, Technical University of Madrid, Spain. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=2901>
- Padrón, R. S. (2013). Analisis de la estructura de la lluvia del paramo. Undergraduate thesis. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P., & Céleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985–996. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Parra, M. (2016). Implementar el Sistema de Modelación WEAP como herramienta que determine el impacto del Cambio Climático sobre la disponibilidad del agua en la Cuenca del Río Machángara.
- Plesca, I., Timbe, E., Exbrayat, J.-F., Windhorst, D., Kraft, P., Crespo, P., ... Breuer, L. (2012). Model intercomparison to explore catchment functioning: Results from a remote montane tropical rainforest. *Ecological Modelling*, 239, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.05.005>
- Podwojewski, P., & Poulenard, J. (2000). Los Suelos del Páramo del Ecuador.

Serie Páramo 5.

- Ponce, V. (1989). Hydrological Models. Engineering Hydrology, 1–61.
- Ramón, J., & Ortiz, F. (2015). Determinación de las principales fuentes de agua que generan escorrentía en zonas de páramo y su contribución, usando Trazadores Ambientales. Retrieved from <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/22291>
- Ramón, M. (2015). Estimación de la fracción de agua de evento y pre evento que aportan al caudal, mediante el uso de Isótopos Estables, en la Cuenca del Río Zhurucay.
- Seibert, J. (2005). HBV light version 2 User's Manual PART 1 -User's Manual.
- Seibert, J., & Vis, M. J. P. (2012). Teaching hydrological modeling with a user-friendly catchment-runoff-model software package. Hydrology and Earth System Sciences, 16(9), 3315–3325. <https://doi.org/10.5194/hess-16-3315-2012>
- Seminario, S. (2016). Incertidumbre en la precipitación espacial diaria causada por Redes Pluviográficas dispersas en una Microcuenca de Páramo densamente monitoreada.
- Turner, I. M., Chua, K. S., Ong, J. S. Y., Soong, B. C., & Tan, H. T. W. (1996). A century of plant species loss from an isolated fragment of lowland tropical rain forest. Conservation Biology, 10(4), 1229–1245. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.1996.10041229.x>
- Zambrano, F. (2010). Modelación hidrológica de una microcuenca Altoandina ubicada en el Austro Ecuatoriano. MASKANA, 1(1).

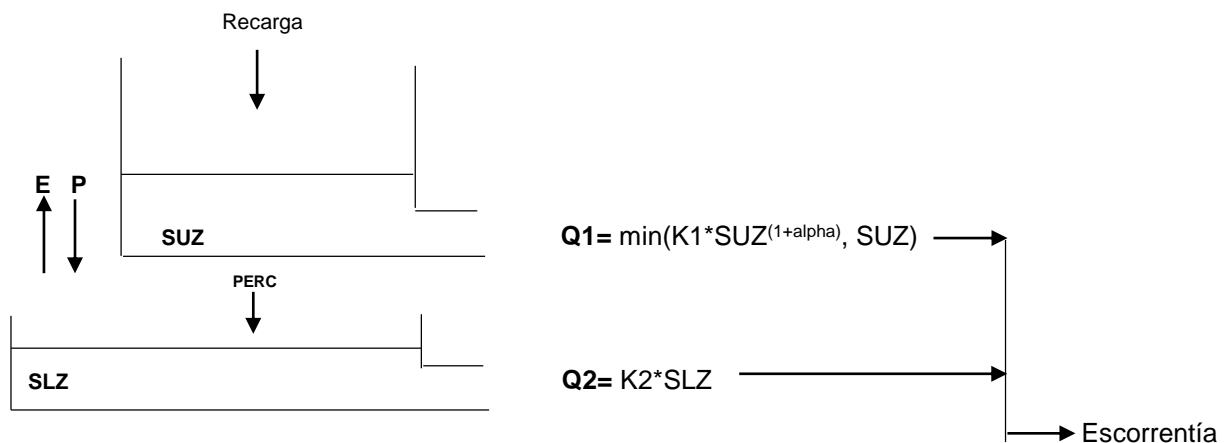
ANEXOS

Anexo 1: Diferentes estructuras que presenta el modelo HBV – light.

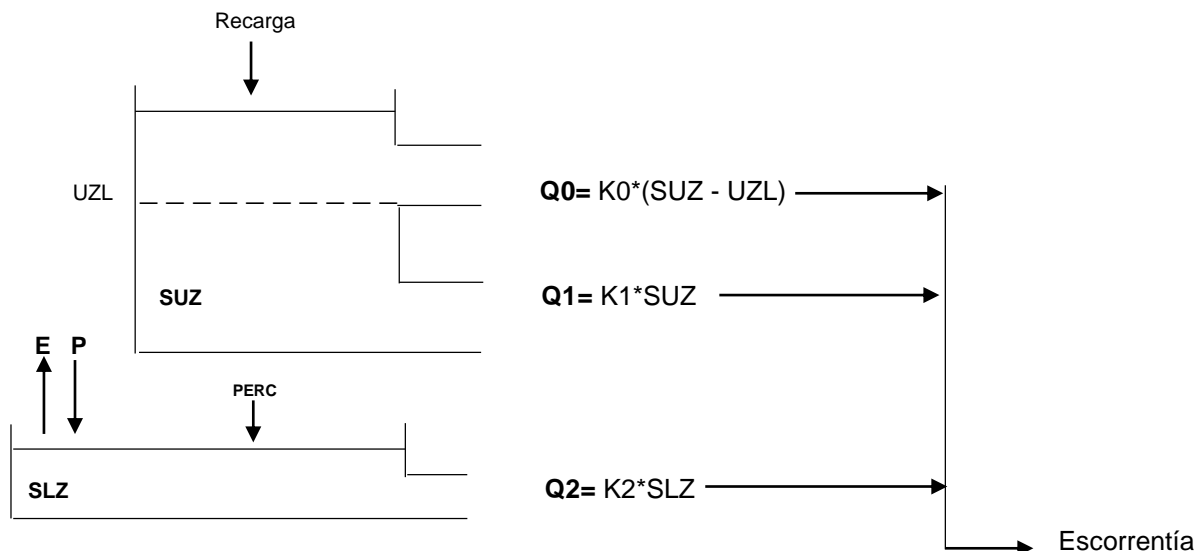
1. MODELO ESTÁNDAR

Existen dos versiones: Versión Básica y Versión UZL, K0 en la capa SUZ

1.1 Versión Básica



1.2 Versión UZL, K0 en la capa SUZ



NOTA: SUZ: no tiene límite superior.

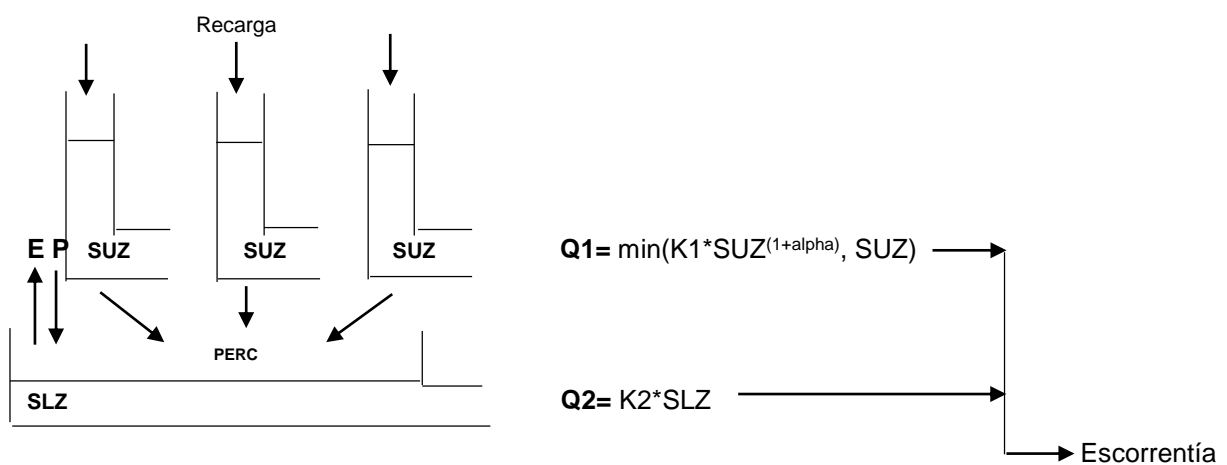
Q2: nunca puede exceder a la PERC

SLZ: nunca puede exceder de PERC/K2

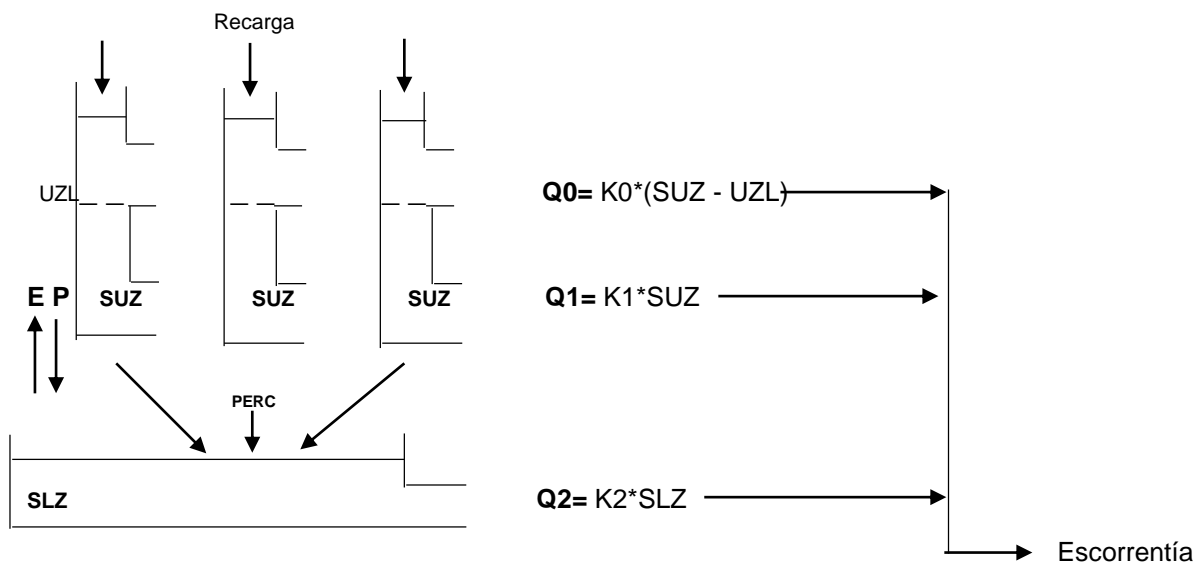
2. MODELO SUZ DISTRIBUIDO

Para cada capa SUZ se utiliza la unidad de vegetación y elevación. Los parámetros (K_0 , K_1 y U_{ZL}) van a ser iguales para cada capa SUZ. Ésta estructura del modelo se divide en: versión básica y Versión U_{ZL} , K_0 en la capa SUZ.

2.1 Versión Básica

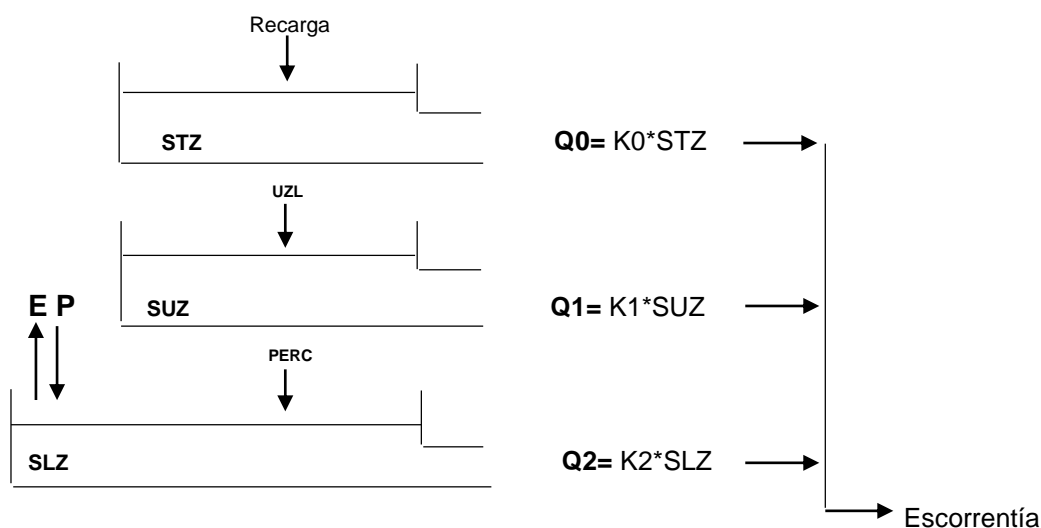


2.2 Versión U_{ZL} , K_0 en la capa SUZ



3. MODELO DE 3 CAPAS DE AGUA SUBTERRÁNEA

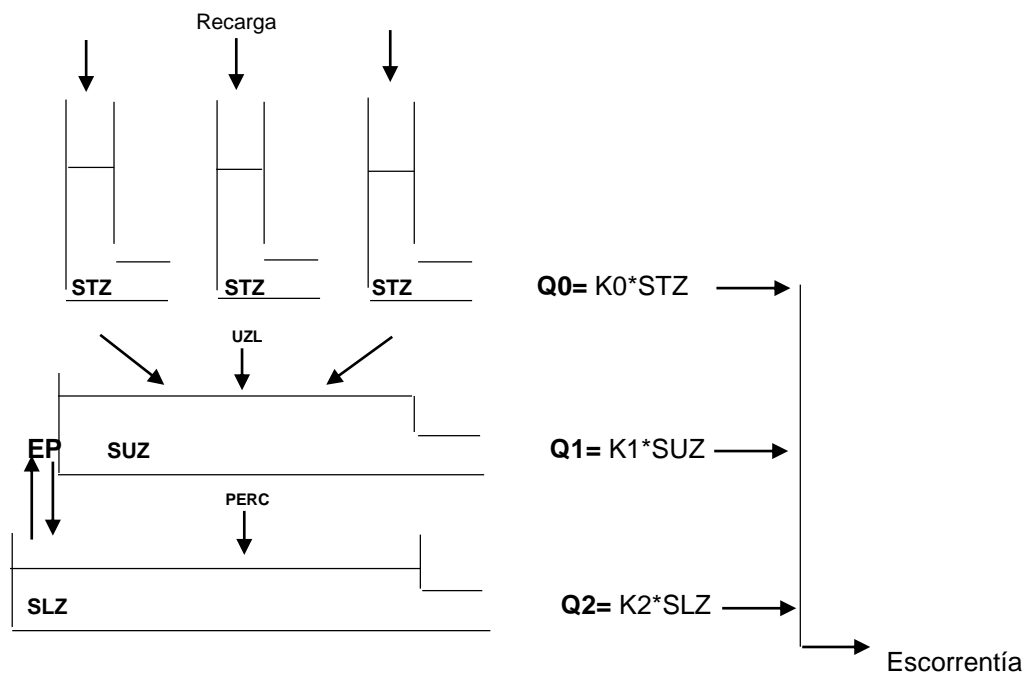
En comparación con el modelo estándar, en lugar de utilizar dos salidas de la capa de agua superior, existe una tercera capa de la parte superior de las otras capas, llamada STZ. De cada capa hay una salida lineal calculada a partir del nivel de agua y (K_0 , K_1 , k_2 para STZ, SUZ y SLZ respectivamente). La forma de flujo SUZ a SLZ se calcula como PERC antes de usar. El flujo STZ hacia SUZ se calcula de la misma manera utilizando el parámetro UZL ($\text{mm}/\Delta t$) como la tasa de flujo máximo.



STZ: Almacenamiento en la zona superior del suelo, más que UZL.

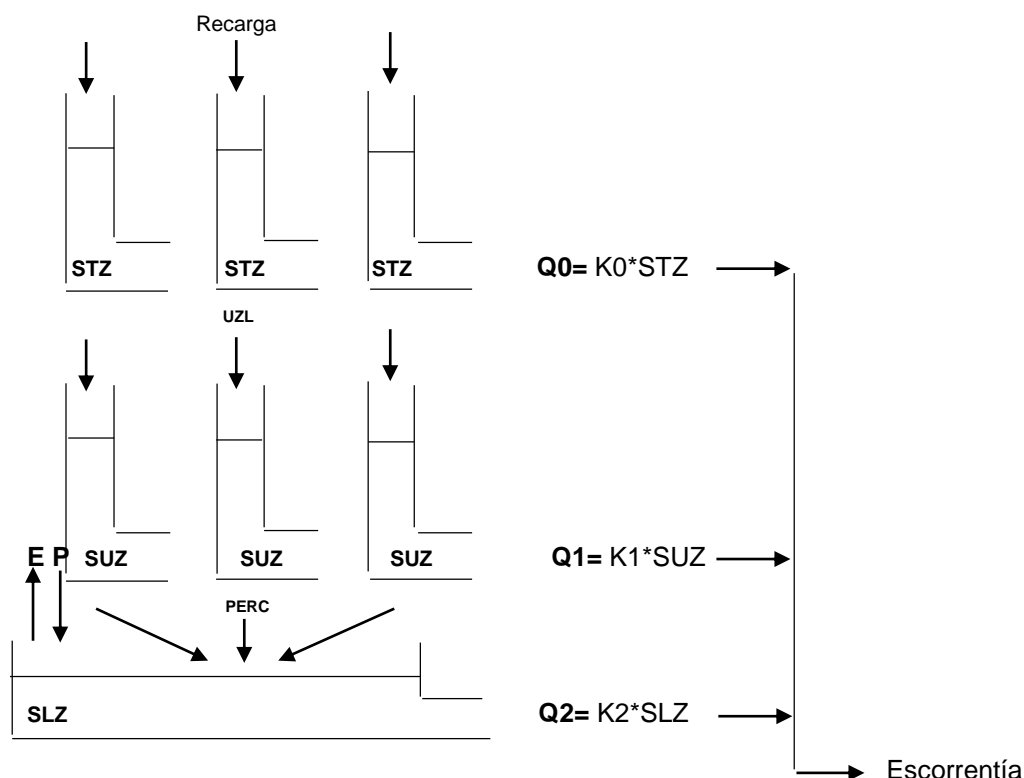
4. MODELO DE 3 CAPAS DE AGUA SUBTERRÁNEA (DISTRIBUCIÓN STZ)

En comparación con el modelo estándar en lugar de utilizar dos salidas de la capa de agua subterránea superior, una tercera capa de la parte superior de las capas, llamado STZ, se distribuye o se utilizan tres capas para cada EVU (Unidad de vegetación y elevación). De cada capa hay una salida lineal calculada a partir del nivel de agua y una constante (K_0 , K_1 , K_2 para STZ, SUZ, SLZ respectivamente). La forma de flujo SUZ a SLZ se calcula como PERC antes de usar. El flujo STZ hacia SUZ se calcula de la misma manera utilizando el parámetro UZL (mm/ Δt) como la tasa de flujo máximo.



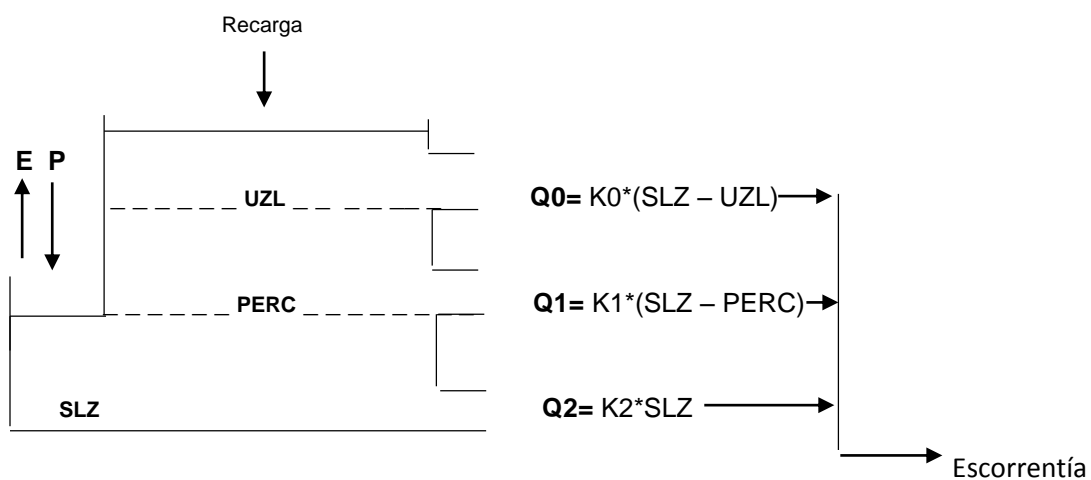
5. MODELO DE 3 CAPAS DE AGUA SUBTERRÁNEA (DISTRIBUCIÓN STZ Y SUZ)

En comparación con el modelo estándar, en lugar de tener dos salidas de la capa de agua subterránea superior, se utiliza una tercera capa de la parte superior de las otras capas. Tanto STZ y SUZ se distribuyen, es decir se utilizan capas individuales para cada EVU (Unidad de vegetación y elevación). De cada capa hay una salida lineal calculada a partir del nivel de agua y una constante (K_0 , K_1 , K_2 para STZ, SUZ, SLZ respectivamente). La forma de flujo SUZ a SLZ se calcula como PERC antes de usar. El flujo de STZ hacia SUZ se calcula de la misma manera utilizando el parámetro UZL (mm/ Δt) como la tasa de flujo máximo.



6. MODELO DE 1 CAPA DE AGUA SUBTERRÁNEA

En comparación con el modelo estándar, en lugar de utilizar dos capas distintas solo se utiliza una capa con tres salidas. La salida se calcula a partir del nivel de agua de ésta capa, a medida que está más abajo de la PERC (mm) solo la salida más baja (K2) se activa. El nivel se eleva y está por encima de PERC y UZL respectivamente, las dos salidas superiores (K1, K0) empiezan a contribuir.



Descripción:

UZL: Límite de almacenamiento del reservorio

STZ: Almacenamiento en la zona superior del suelo, más que UZL.

SUZ: Almacenamiento de agua en la capa superior.

SLZ: Almacenamiento de agua en la capa inferior.

K0, K1, K2: Coeficientes de recesión.

PERC: Percolación, máxima percolación hacia la zona inferior.

Q, Q1, Q2: Caudal de salida.

ALPHA: Coeficiente de no linealidad.

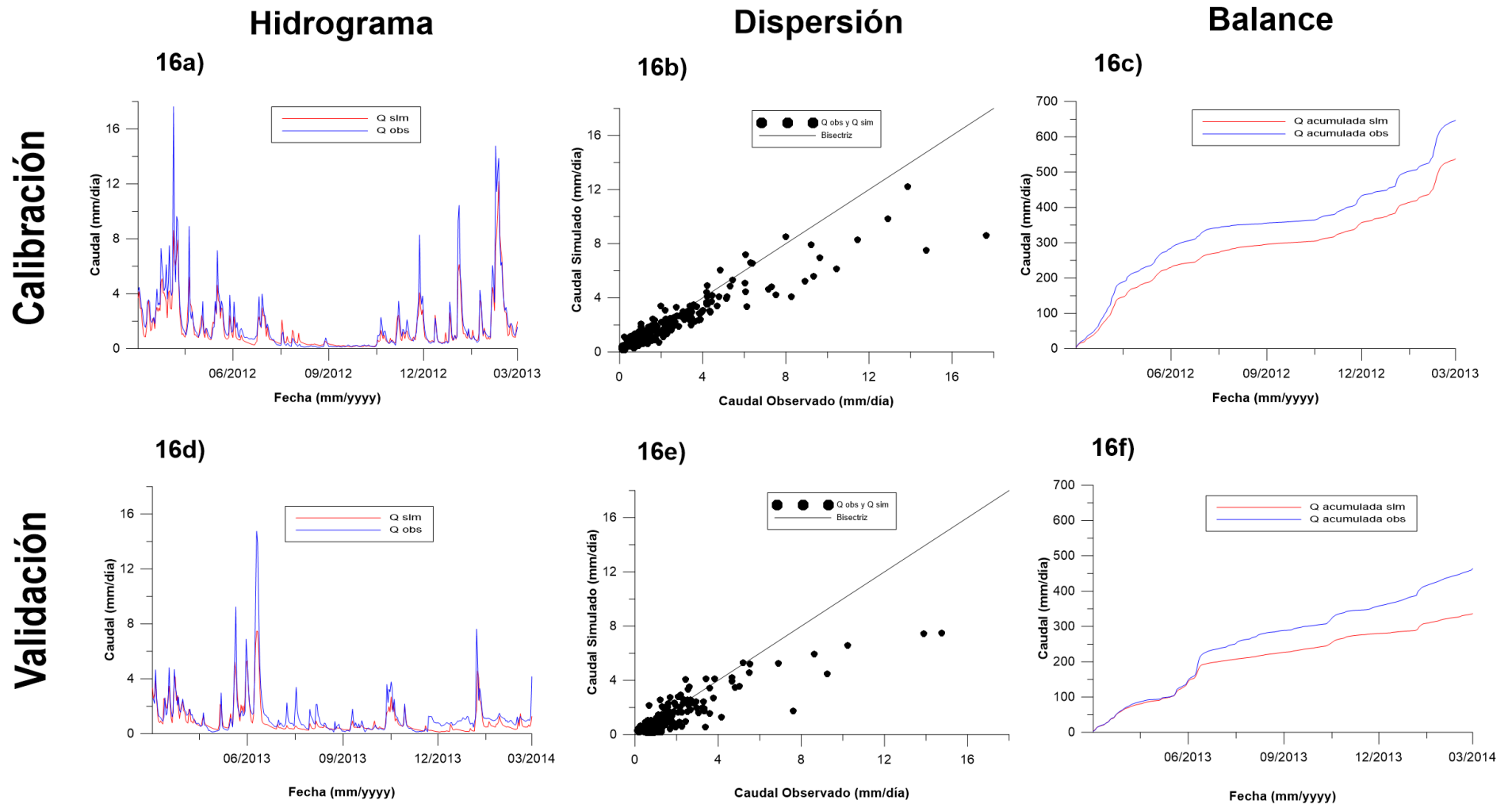
Anexo 2: Parámetros que se aplican para cada estructura..

Estructuras	Parámetros
1. Modelo Estándar.	
1.1 Versión Básica	FC, LP, B, PERC, ALPHA, K1,K2, MAXBAS
1.2 Versión UZL, K0 en la capa SUZ	FC, LP, B, PERC, UZL, K0, K1,K2, MAXBAS
2. Modelo SUZ distribuido.	
2.1 Versión Básica	FC, LP, B, PERC, ALPHA, K1,K2, MAXBAS
2.2 Versión UZL, K0 en la capa SUZ	FC, LP, B, PERC, UZL, K0, K1,K2, MAXBAS
3. Modelo con 3 capas de agua subterránea.	FC, LP, B, PERC, UZL, K0, K1,K2, MAXBAS
4. Modelo con 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ).	FC, LP, B, PERC, UZL, K0, K1,K2, MAXBAS
5. Modelo con 3 capas de agua subterránea (Distribución STZ y SUZ).	FC, LP, B, PERC, UZL, K0, K1,K2, MAXBAS
6. Modelo con una capa de agua subterránea.	FC, LP, B, PERC, UZL, K0, K1,K2, MAXBAS

Anexo 3: Estructuras adicionales de calibración y validación de optimización de Nash – In del modelo HBV – light agregado.**Tabla 12:** Valores de los índices de eficiencia optimizado por In - Nash.

CALIBRACIÓN					VALIDACIÓN			
OPTIMIZADO POR NASH - IN								
Estructuras	Índices Estadísticos				Índices Estadísticos			
	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Modelo SUZ Distribuido (Versión UZL, K0 en la capa SUZ)	0.83	0.87	0.89	108.82	0.68	0.45	0.77	128

Figura 16: Calibración y Validación del Modelo SUZ Distribuido (Versión UZL, K0 en la capa SUZ) optimizado por Nash – In.



Anexo 4: Estructuras adicionales de calibración y validación de optimización de Sesgo Relativo Bias del modelo HBV – light agregado.**Tabla 13:** Valores de los índices de eficiencia optimizado por Sesgo Relativo Bias.

CALIBRACIÓN					VALIDACIÓN			
OPTIMIZADO POR BIAS								
Estructuras	Índices Estadísticos				Índices Estadísticos			
	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica)	0.8	0.65	0.83	0.05	0.59	0.5	0.6	-19
Modelo de 3 cajas de agua subterránea (Distribución STZ y SUZ)	0.79	0.63	0.87	0.018	0.62	0.65	0.68	50

Figura 17: Calibración y Validación del Modelo SUZ Distribuido optimizado por Sesgo Relativo Bias.

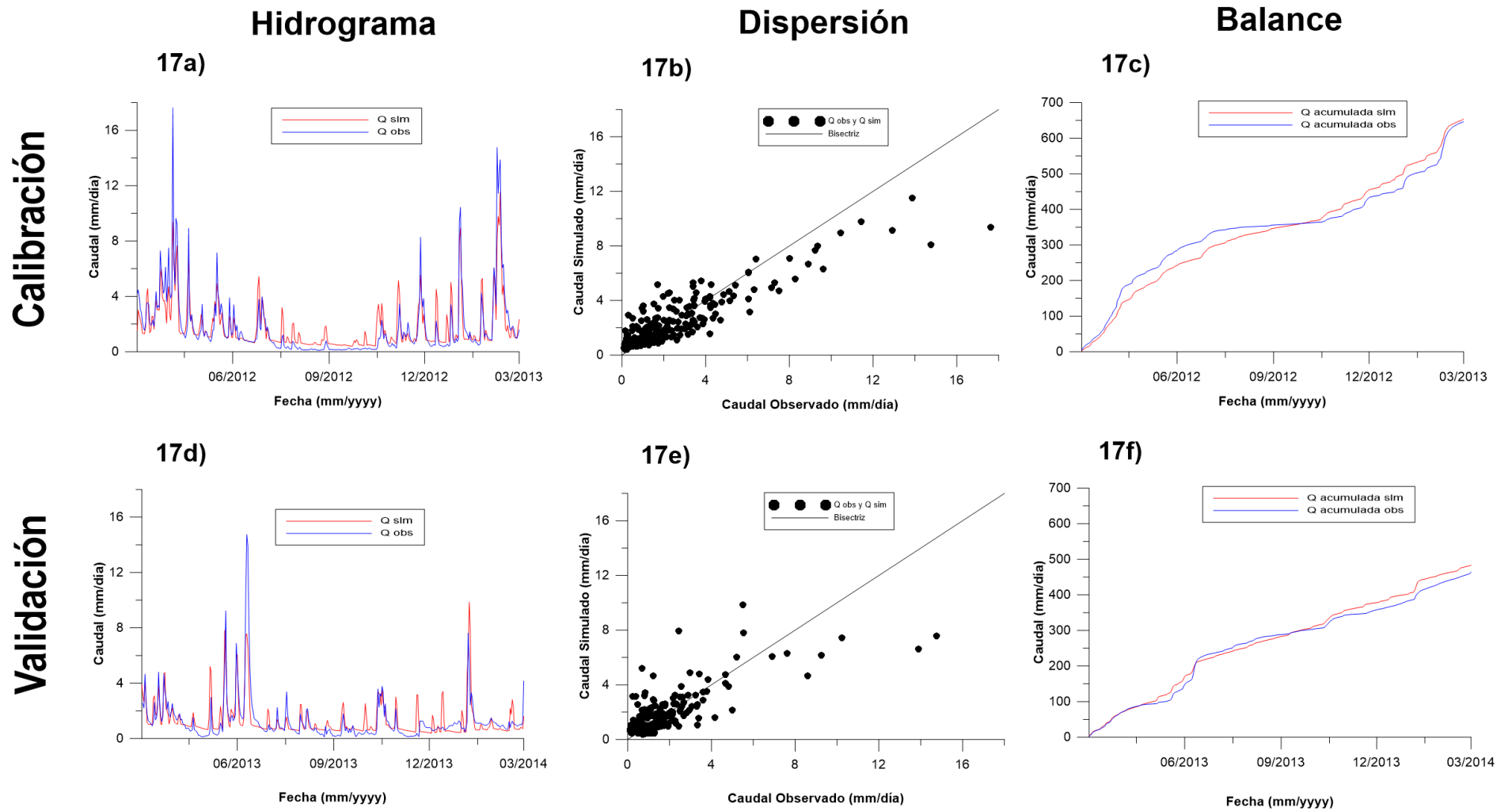
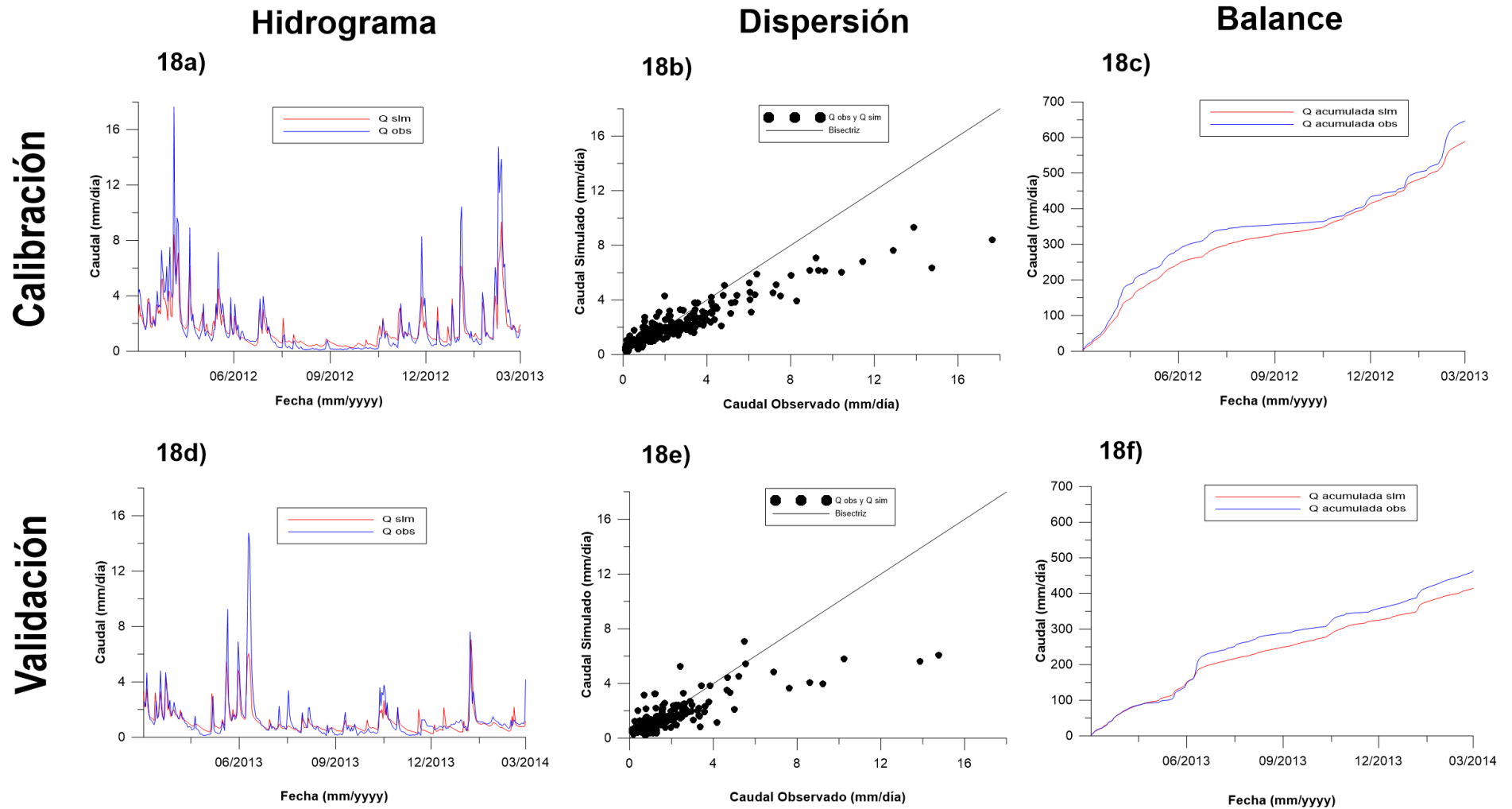


Figura 18: Calibración y Validación del Modelo de 3 cajas de agua subterránea (Distribución STZ y SUZ) optimizado por Sesgo Relativo Bias.

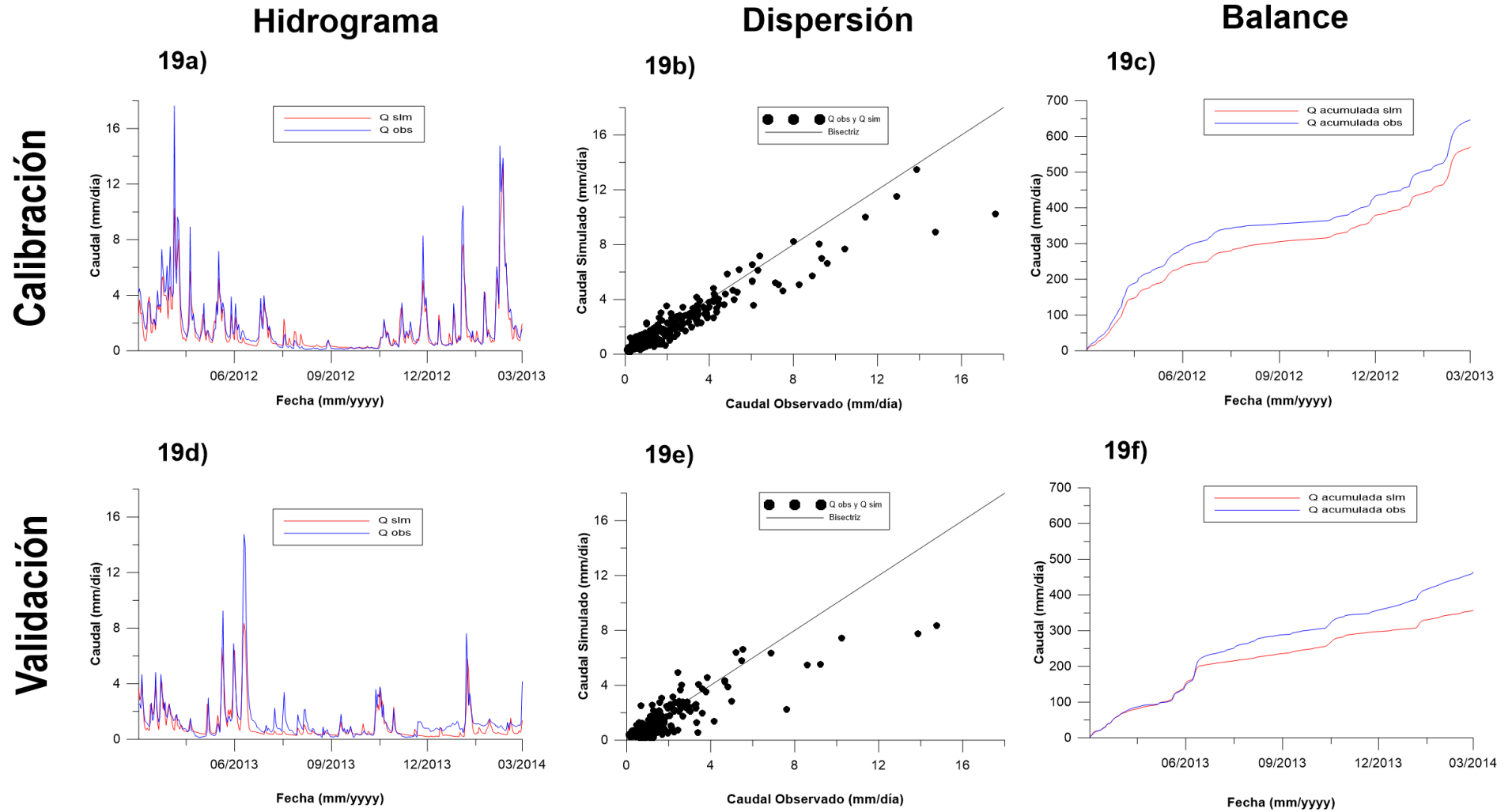


Anexo 5: Estructuras adicionales de calibración y validación de optimización de Nash - Sutcliffe del modelo HBV – light semidistribuido.

Tabla 14: Valores de los índices de eficiencia optimizado por de Nash - Sutcliffe para el modelo hidrológico HVB – light semidistribuido.

CALIBRACIÓN					VALIDACIÓN			
OPTIMIZADO POR NASH - SUTCLIFFE								
Estructuras	Índices Estadísticos				Índices Estadísticos			
	Nash - Sutcliffe	Nash - ln	R2	Bias	Nash - Sutcliffe	Nash - ln	R2	Bias
Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica)	0.77	0.61	0.79	57.46	0.63	0.46	0.71	65.25

Figura 19: Calibración y Validación del Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica) optimizado por Nash – Sutcliffe.



Anexo 6: Estructuras adicionales de calibración y validación de optimización de Nash – In del modelo HBV – light semistribuido.

Tabla 14: Valores de los índices de eficiencia optimizado por de Nash - In para el modelo hidrológico HVB – light semidistribuido.

CALIBRACIÓN					VALIDACIÓN			
OPTIMIZADO POR NASH - IN								
Estructuras	Índices Estadísticos				Índices Estadísticos			
	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias	Nash - Sutcliffe	Nash - In	R2	Bias
Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica)	0.66	0.71	0.75	117.56	0.52	0.48	0.62	120.38

Figura 20: Calibración y Validación del Modelo SUZ Distribuido (Versión Básica) optimizado por Nash – In.

